

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Špehar

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Marko Špehar

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na savjetima i primjedbama tijekom izrade ovoga rada.

Posebno hvala asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech., na svim savjetima, kritikama i pruženoj pomoći tijekom izrade rada.

Zahvaljujem svim djelatnicima Laboratorija za zavarivanje i Laboratorija za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnoga dijela rada.

Također, zahvaljujem svim kolegama i prijateljima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

I na kraju se posebno zahvaljujem svojoj obitelji na ukazanom povjerenju, podršci i strpljenju tijekom studiranja.

Marko Špehar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARKO ŠPEHAR**

Mat. br.: **0035188538**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**PRIMJENA IMPULSNIH STRUJA PRI ROBOTIZIRANOM MAG
ZAVARIVANJU**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**APPLICATION OF PULSE CURRENT IN ROBOTIZED MAG
WELDING**

Opis zadatka:

Opisati konfiguracije robotskih stanica za MAG zavarivanje uključujući dodatne elemente poput senzora za praćenje i sustava za čišćenje pištolja. Proučiti MAG zavarivanje impulsnim strujama te usporediti sa štrcajućim lukom i prijenosom metala kratkim spojevima. Analizirati mogućnosti primjene impulsnih struja za pojedine vrste osnovnih materijala i debljina.

U eksperimentalnom dijelu za debljinu materijala 10mm kvalitete S235 odrediti parametre zavarivanja kutnog spoja debljine $a=5\text{mm}$. Primijeniti trokomponentni zaštitni plin C6X1. Zavarivanje ispitnog uzorka provesti na robotskoj stanici pri čemu je potrebno načiniti programe za impulsno zavarivanje, kratke spojeve i štrcajući luk. Odrediti tehnologiju zavarivanja za sve tri opcije prijenosa metala i na temelju komparativne analize odrediti optimalnu varijantu.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

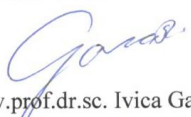
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.


2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:


Izv.prof.dr.sc. Ilica Garašić

v.d. predsjednika Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA	2
2.1. Načini prijenosa metala kod MIG/MAG postupka	4
2.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima	4
2.1.2. Prijenos metala mješovitim lukom.....	6
2.1.3. Prijenos metala štrcajućim lukom	8
2.1.4. Prijenos metala impulsnim lukom.....	10
2.2. Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja	13
2.2.1. Izvor struje za zavarivanje	15
2.2.2. Sustav za dovod žice	16
2.2.3. Pištolj za zavarivanje	19
2.3. Zaštitni plinovi za MIG/MAG postupak zavarivanja	20
2.3.1. Svojstva pojedinih zaštitnih plinova	20
3. ROBOTSKE STANICE ZA MIG/MAG ZAVARIVANJE.....	22
3.1. Roboti za elektrolučno zavarivanje.....	23
3.2. Konfiguracije robotskih stanica za MIG/MAG zavarivanje	24
3.3. Senzori kod robotiziranoga zavarivanja.....	32
3.3.1. Senzori za mjerenje tehnoloških parametara	32
3.3.1.1. Mjerenje napona.....	32
3.3.1.2. Mjerenje jakosti struje.....	33
3.3.1.3. Mjerenje brzine dovođenja žice	33
3.3.2. Senzori za praćenje spoja.....	34
3.3.2.1. Optički senzori	34
3.3.2.2. Električni luk kao senzor	36
4. EKSPERIMENTALNI RAD.....	38
4.1. Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnoga dijela rada.....	38
4.1.1. Oprema za zavarivanje.....	38
4.1.2. Osnovni materijal.....	40
4.1.3. Dodatni materijal	40
4.1.4. Zaštitni plin	42
4.2. Priprema spoja.....	43
4.3. Zavarivanje uzoraka	43
4.3.1. Uzorak 1	45
4.3.2. Uzorak 2.....	47
4.3.3. Uzorak 3.....	49

4.4. Izrada makroizbrusaka	51
4.5. Geometrija zavara	53
5. ZAKLJUČAK.....	60
LITERATURA.....	61
PRILOZI.....	64

POPIS SLIKA

Slika 1.	Detalj MIG/MAG procesa zavarivanja [2].....	2
Slika 2.	Podjela načina prijenosa metala u električnome luku [5].....	4
Slika 3.	Dijagramski prikaz ovisnosti struje i napona tijekom kratkoga spoja [7].....	5
Slika 4.	Prijenos metala mješovitim lukom [9]	7
Slika 5.	Prijenos metala štrcajućim lukom [11].....	9
Slika 6.	Prikaz električnoga impulsa i njegovih pripadajućih parametara [12].....	11
Slika 7.	Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja [14].....	14
Slika 8.	Uređaj za MIG/MAG zavarivanje [15]	15
Slika 9.	Prikaz ravne statičke karakteristike izvora struje [7]	16
Slika 10.	Uređaj za dodavanje žice [17]	17
Slika 11.	Dobava žice <i>push</i> sustavom [16].....	18
Slika 12.	Dobava žice <i>push – pull</i> sustavom [16].....	18
Slika 13.	Pištolj za MIG/MAG zavarivanje [15].....	19
Slika 14.	Robot za elektrolučno zavarivanje [21].....	23
Slika 15.	Robotska stanica za MIG/MAG postupak zavarivanja [23]	24
Slika 16.	Robotski manipulator za MIG/MAG zavarivanje [25]	25
Slika 17.	Različite izvedbe robotskih manipulatora za zavarivanje [27].....	26
Slika 18.	Upravljačka jedinica i privjesak za učenje [28]	27
Slika 19.	Izvori struje za robotizirano zavarivanje [29]	28
Slika 20.	Jednostruki robotizirani okretni pozicioner [31]	29
Slika 21.	Dvostruki robotizirani okretni pozicioner [31]	30
Slika 22.	Robotizirani okretno – nagibni pozicioner [32]	30
Slika 23.	Sustav za čišćenje pištolja i rezanje žice	31
Slika 24.	Prikaz metode triangulacije [34]	34
Slika 25.	Praćenje zavara pomoću principa skeniranja i metode triangulacije [34]	35
Slika 26.	Prikaz središnje točke alata i ortonormalnog koordinatnog sustava n – o – a [35].....	37
Slika 27.	Robotska stanica Almaga OTC AX V6 [36].....	38
Slika 28.	Specifikacija dodatnoga materijala [39].....	41
Slika 29.	Boce sa zaštitnim plinovima.....	42
Slika 30.	Prikaz debljina zavarivanih ploča.....	43
Slika 31.	Prikaz kuta pištolja za zavarivanje	44
Slika 32.	Program za zavarivanje uzorka 1	45
Slika 33.	Uzorak 1	46
Slika 34.	Program za zavarivanje uzorka 2	47
Slika 35.	Uzorak 2	48
Slika 36.	Program za zavarivanje uzorka 3	49
Slika 37.	Uzorak 3	50
Slika 38.	Makroizbrusak presjeka zavara – uzorak 1	51
Slika 39.	Makroizbrusak presjeka zavara – uzorak 2	52
Slika 40.	Makroizbrusak presjeka zavara – uzorak 3	52
Slika 41.	Prikaz mjerenja karakterističnih dimenzija zavara uzorka 1	53
Slika 42.	Prikaz mjerenja karakterističnih dimenzija zavara uzorka 2	54
Slika 43.	Prikaz karakterističnih dimenzija zavara uzorka 3	55
Slika 44.	Usporedba dimenzija Z zavara po uzorcima	56
Slika 45.	Usporedba dimenzija S zavara po uzorcima	57
Slika 46.	Usporedba debljina zavara po uzorcima	57

Slika 47.	Usporedba dimenzija N zavara po uzorcima.....	58
Slika 48.	Usporedba dimenzija P zavara po uzorcima	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba impulsnoga načina prijenosa metala sa ostalim vrstama [13].....	13
Tablica 2. Karakteristike izvora struje [37].....	39
Tablica 3. Kemijski sastav čelika S235 [38].....	40
Tablica 4. Mehanička svojstva čelika S235 [37].....	40
Tablica 5. Sastav mješavine Ferroline C6X1	42
Tablica 6. Parametri zavarivanja ispitnoga uzorka 1	46
Tablica 7. Parametri zavarivanja ispitnoga uzorka 2	48
Tablica 8. Parametri zavarivanja ispitnoga uzorka 3	50
Tablica 9. Vrijednosti karakterističnih dimenzija zavara uzorka 1	53
Tablica 10. Vrijednosti karakterističnih dimenzija zavara uzorka 2	54
Tablica 11. Vrijednosti karakterističnih dimenzija zavara uzorka 3	55
Tablica 12. Skupni prikaz vrijednosti karakterističnih dimenzija uzoraka	56

POPIS KRATICA

Ar	Argon
C	Ugljik
CO ₂	Ugljikov dioksid
Cu	Bakar
DC	Istosmjerna struja (od eng. Direct Current)
H ₂	Vodik
He	Helij
HNO ₃	Dušična kiselina
KV	Ispitni uzorak s V zarezom kod mjerenja udarnoga rada loma
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštitnoj atmosferi aktivnoga plina (od eng. Metal Active Gas)
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštitnoj atmosferi inertnoga plina (od eng. Metal Inert Gas)
Mn	Mangan
N ₂	Dušik
O ₂	Kisik
P	Fosfor
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
S	Sumpor
Si	Silicij
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnoga plina (od eng. Tungsten Inert Gas)
TCP	Središnja točka alata (od eng. Tool Center Point)

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Konačno istezanje
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje
KV	J	Udarni rad loma
l	mm	Duljina slobodnoga kraja žice
L	H	Induktivitet
m	kg	Masa
R_e	MPa	Granica razvlačenja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
t	s	Vrijeme
U	V	Napon zavarivanja
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
η	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja

SAŽETAK

U teorijskome dijelu rada obrađeni su MIG/MAG postupak zavarivanja i stanice za robotizirano zavarivanje istim postupkom. Opisani su načini prijenosa metala u električnome luku, a posebna pozornost posvećena je prijenosu metala impulsnim lukom. Također, opisani su osnovni dijelovi robotske stanice za MIG/MAG zavarivanje uključujući i sustav za čišćenje pištolja, a dan je i pregled senzora koji se upotrebljavaju kod istih.

Cilj eksperimentalnoga dijela rada bilo je utvrđivanje optimalne varijante prijenosa metala na temelju rezultata zavarivanja tri ispitna uzorka. Određeni su parametri procesa i izrađeni su programi za zavarivanje svakoga pojedinoga uzorka. Na kraju rada izvršena je analiza dobivenih rezultata i doneseni su zaključci sukladno tome.

Ključne riječi: MIG/MAG zavarivanje, impulsni luk, robot

SUMMARY

The theoretical part of the thesis deals with MIG/MAG welding process and robot welding stations applying the same procedure. Modes of metal transfer are described, with special attention being given to pulsed spray metal transfer. Also, the basic configuration of MIG/MAG robotic welding station is described, including a torch cleaning station, and a review of the sensors used within are given.

The aim of the experimental part of the thesis was to determine the optimal variant of the metal transfer mode based on the results given from welding of three test samples. Process parameters were defined and welding programs for each individual sample were created. At the end of the paper, an analysis of the obtained results was made and conclusions were drawn accordingly.

Key words: MIG/MAG welding, pulsed spray transfer, robot

1. UVOD

Primjena robota u području tehnologije zavarivanja desetljećima je duga praksa. Prva opsežnija primjena zavarivačkih robota počela je osamdesetih godina prošloga stoljeća u automobilskoj industriji, uglavnom za proces elektrootpornoga točkastoga zavarivanja. Pojavom senzora i sposobnosti za upravljanje procesima, kao i napredne tehnologije programiranja robota, zavarivački roboti nisu samo upotrebljavani za proizvodnju velikih količina, već i za obavljanje nekih zadataka manjega volumena. Takvi zadaci su česti u industrijama poput brodogradnje, offshorea i montaže proizvoda. Mnogi industrijski pogoni, uključujući već navedene oplemenjeni su provedenom robotizacijom zavarivačkih procesa pošto su time otklonjene brojne mane koje se mogu pripisati ljudskome faktoru. Ključne prednosti robotiziranoga zavarivanja uključuju povećanu kvalitetu zavarenoga spoja i produktivnost te manje proizvodne troškove, što u konačnici vodi ka jeftinijim i kvalitetnijim proizvodima.

Elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnoga/aktivnoga plina (MIG/MAG) jedan je od najzastupljenijih postupaka nerastavljivoga spajanja u industriji. Unatoč svojoj relativno dugoj povijesti, kontinuirani razvoj i istraživanje ovoga postupka zavarivanja (ponajprije zahvaljujući razvoju izvora struje za zavarivanje) pruža mogućnosti novih poboljšanja, a konačni cilj je kvaliteta zavarenih spojeva, visoka produktivnost i ekonomičnost postupka. Uz to, postupak je moguće robotizirati bez većih problema zato što izvedbom pripada poluautomatskim postupcima. Mehanizirani dovod žice u električni luk čini proces kontinuiranim. Ugradnjom pištolja za zavarivanje u robotski manipulator dobiven je sustav kojim se upravlja putem privjeska za učenje, u odgovarajućem softwreu.

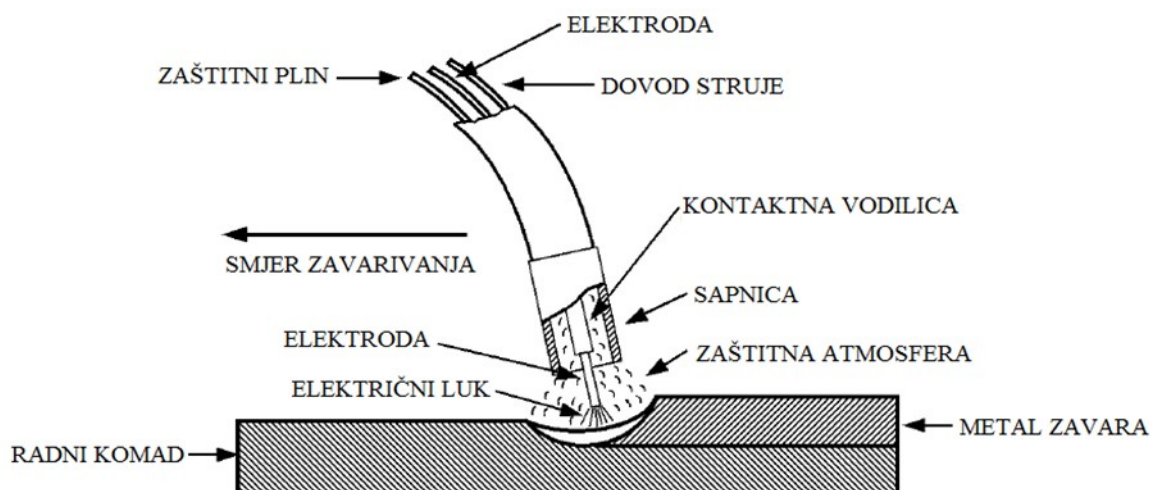
Osim robotskih stanica za ovaj postupak zavarivanja radom su obuhvaćeni i načini prijenosa metala u električnome luku. Pravilnim izborom parametara zavarivanja moguće je ostvariti odgovarajući prijenos metala koji se za odabranu svrhu smatra najboljim rješenjem. Dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja te je s obzirom na to posebni naglasak stavljen na prijenos metala impulsnim lukom.

2. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MIG/MAG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnoga zavarivanja u zaštitnoj atmosferi inertnoga (MIG – Metal Inert Gas) ili aktivnoga (MAG – Metal Active Gas) plina. Električni luk ostvaruje se između radnoga komada i taljive, kontinuirane elektrode koja je u ovome postupku zavarivanja ujedno i dodatni materijal.

Iako se osnovni principi i razvoj kontinuiranoga električnoga luka za zavarivanje spominju već početkom 19. stoljeća, elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnih/aktivnih plinova (MIG/MAG ili GMAW – Gas Metal Arc Welding) primjenu u industriji nalazi tek sredinom 20. stoljeća. Ovaj je postupak prvotno namijenjen zavarivanju aluminijske legure, a veću primjenu u zavarivanju čelika pronalazi razvojem aktivnih plinova i mješavina plinova koje su znatno smanjile cijenu zavarivanja. Razvoj ovoga postupka prije svega je potaknut zbog veće brzine zavarivanja, veće količine rastaljenoga materijala u jedinici vremena, jednostavnoga rukovanja ili automatizacije, zbog čega je i danas jedan od najčešće korištenih postupaka u zavarivačkoj industriji [1].

Postupak može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili potpuno automatiziran, odnosno robotiziran. Slikom 1 prikazan je detalj MIG/MAG procesa zavarivanja.



Prednosti postupka su sljedeće [3]:

- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa metala
- zavarivanje u svim položajima
- zavarivanje u radionici i na terenu
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- široki raspon debljina
- velika učinkovitost i proizvodnost
- pogodan za automatizaciju
- moguća primjena i za lemljenje.

Nedostaci [3]:

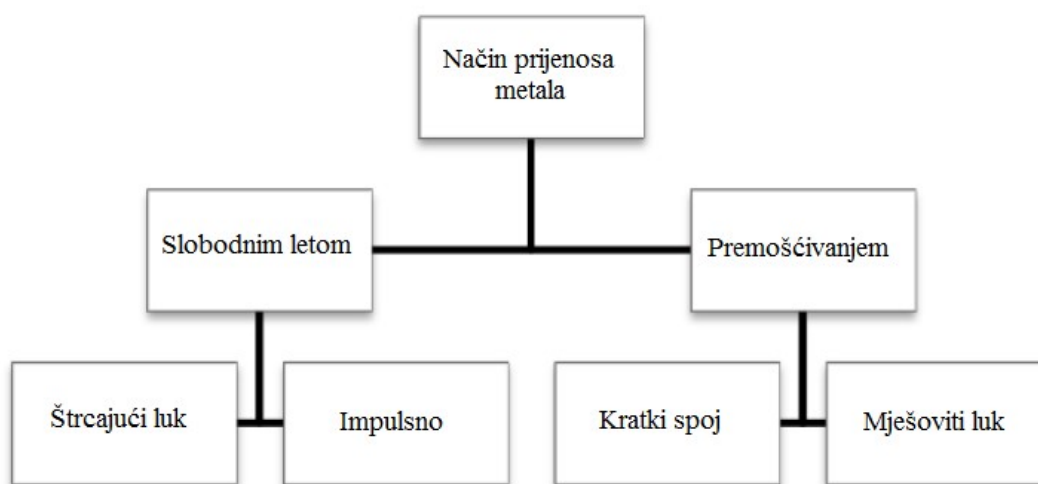
- prilikom rada na otvorenome potrebna je zaštita od vjetra
- problemi kod dovođenja žice (posebno aluminij)
- složeniji uređaji (dovođenje žice i automatska regulacija) i skuplji u odnosu na REL postupak
- povećani broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost)
- pojava rasprskavanja prilikom zavarivanja kratkim spojevima.

Parametri procesa koje je potrebno podesiti prije zavarivanja su:

- jakost električne struje
- napon električnoga luka
- brzina zavarivanja
- slobodni kraj žice
- vrsta zaštitnoga plina
- protok zaštitnoga plina
- induktivitet
- promjer žice.

2.1. Načini prijenosa metala kod MIG/MAG postupka

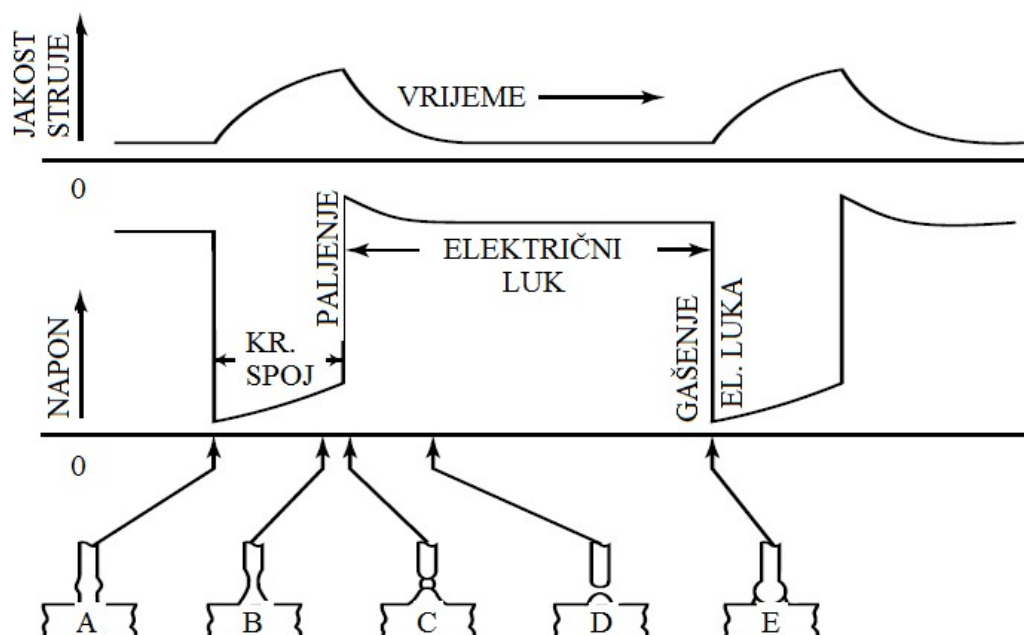
Kod elektrolučnoga zavarivanja taljivom elektrodom postoje dva osnovna načina prijenosa dodatnoga materijala od elektrode do radnoga komada tj. taline. Materijal se može prenositi slobodnim letom kapljica ili premošćivanjem. Zbog specifičnosti pojava i duljine električnoga luka kod prijenosa premošćivanjem razlikujemo prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom, a kod prijenosa slobodnim letom kapljica štrcajući i impulsni luk [4]. Podjela načina prijenosa metala u električnome luku prikazana je slikom 2.



Slika 2. Podjela načina prijenosa metala u električnome luku [5]

2.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenosom metala kratkim spojevima dolazi do taljenja kontinuirano dobavljane žice pomoću električnih kratkih spojeva koji se periodički ponavljaju. Kod prijenosa kratkim spojevima, ovisno o promjeru žice, koriste se male struje zavarivanja (od 50 A do 170 A), niski naponi (od 13 V do 21 V) te zaštitni plin CO_2 ili mješavine ($\text{CO}_2 + \text{Ar}$, $\text{CO}_2 + \text{Ar} + \text{O}_2$). Glavne značajke su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnoga materijala vrši pri fizičkome dodiru elektrode i osnovnoga materijala odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkih spojeva i fazu električnoga luka [6]. Slikom 3 dan je dijagramski prikaz ovisnosti struje i napona tijekom kratkoga spoja.



Slika 3. Dijagramski prikaz ovisnosti struje i napona tijekom kratkoga spoja [7]

Objašnjenje faza prijenosa kapljica metala električnim lukom kratkoga spoja [7]:

- A. Elektroda ostvaruje fizički kontakt sa rastaljenim metalom, napon luka se približava nuli, a jakost struje se povećava, brzina porasta struje ovisi o količini primijenjenog induktiviteta
- B. Ova točka pokazuje utjecaj elektromagnetskih sila koje su podjednako aktivne oko elektrode, napon počinje polagano rasti s vremenom prije odvajanja dok jakost struje nastavlja rasti ka vršnoj vrijednosti
- C. U ovoj točki dolazi do odvajanja kapljice od vrha elektrode, jakost struje postiže maksimalnu vrijednost
- D. Kratki spoj završava te za vrijeme silazne putanje jakosti struje prema nultoj vrijednosti počinje stvaranje nove kapljice
- E. Elektroda ponovno dolazi u dodir sa rastaljenim metalom i priprema se prijenos nove kapljice, učestalost toga je između 20 i 200 puta u sekundi, frekvencija kratkoga spoja je uvjetovana veličinom induktiviteta i vrstom zaštitnoga plina, dodatak argona povećava frekvenciju kratkih spojeva i snižava veličinu kapljice.

Zbog maloga unosa topline posebno je pogodan za zavarivanje tanjih materijala (0,6-5,0 mm), a često se koristi pri zavarivanju korijena cjevovoda.

Elektrode koje se koriste pri ovome načinu prijenosa metala promjera su od 0,6 mm do 1,1 mm u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂ ili u mješavini sa 75-80 % argona sa 20-25 % CO₂.

Prednosti prijenosa metala kratkim spojevima [7]:

- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- podnosi greške nastale prilikom pripreme zavara
- manje deformacije zavara uslijed manjega unosa topline
- iskorištenost elektrode više od 93 %
- lakši rad operateru.

Ograničenja [7]:

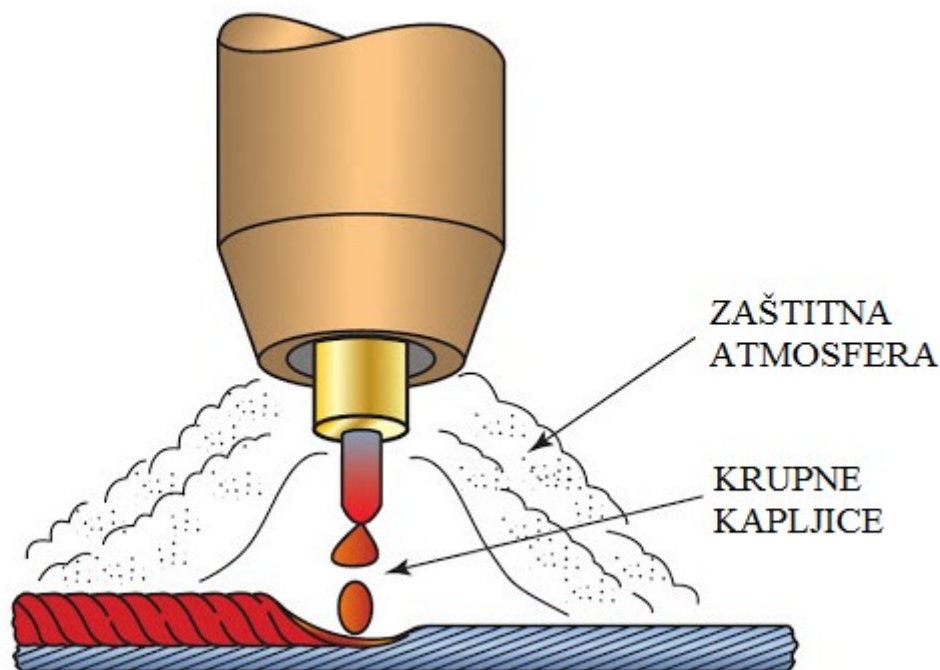
- primjena kod manjih debljina osnovnih materijala
- potrebno zaštititi područje zavarivanja na otvorenome od utjecaja vjetra
- pojava pretjeranoga rasprskavanja i nedovoljnoga protaljivanja ako nije dobra kontrola procesa.

2.1.2. Prijenos metala mješovitim lukom

Kod prijenosa metala mješovitim lukom pojavljuje se prijenos štrcajućim lukom, ali se povremeno pojavi jedan ili više kratkih spojeva. Odvija se stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu elektrodne žice koja se pod djelovanjem sila u električnom luku odvaja i pada u talinu bez kratkoga spoja. Pojedine kapljice, ovisno o duljini električnoga luka, gustoći i jakosti struje te naponu luka, mogu toliko narasti da u određenom trenutku dodirnu talinu čime nastupa kratki spoj.

Za postizanje prijenosa metala mješovitim lukom prikladne su veće struje zavarivanja (od 170 A do 235 A) i naponi (od 22 V do 25 V), ovisno o promjeru žice. Takvi parametri uzrokuju pojavu većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu. Preporučuje se korištenje mješovitoga luka u kombinaciji sa što inertnijim zaštitnim plinom kako kapljice koje prelijeću kroz luk ne bi reagirale sa plinom i donijele neželjene elemente u metal zavara. Često se događa da se kapljica prilikom dodira sa rastaljenom talinom rasprsne. Iako se ovom vrstom luka može zavarivati velikim brzinama uz jeftinu opremu, u novije vrijeme zamijenjen je novim, naprednijim postupcima zbog skupe naknadne obrade koja je često potrebna zbog rasprskavanja kapljica metala [6, 8].

Slikom 4. prikazan je prijenos metala mješovitim lukom.



Slika 4. Prijenos metala mješovitim lukom [9]

Tijekom mješovitoga električnoga luka preporučuje se koristiti inertni plin ($\text{Ar} + \text{He}$) zbog nasilnoga odvajanja kapljica koje nepravilnim preletom do rastaljene kupke metala mogu navući neželjene elemente u metal zavora. Zavarivanje pomoću prijelaznoga električnoga luka je obilježeno mješovito stabilnim radom u kratkom spoju te nestabilnim radom štrcajućim lukom gdje se kapljice nepravilno formiraju te prilikom dodira sa rastaljenom talinom često nasilno rasprskuju [10].

Prilikom zavarivanja uz niske vrijednosti napona struje električni luk je vrlo kratak te se veći dio žice elektrootporno zagrijava i sudara s radnim komadom, a zbog velikoga unosa topline kapljica vrlo intenzivno rasprskava. Zavarivanje provedeno uz više vrijednosti napona struje manifestira visok električni luk koji ne zagrije radni komad i kraj žice dovoljno, čime se događa naljepljivanje ili nedovoljno protaljšivanje te nagomilavanje zavora [10].

Posebni problemi javljaju se prilikom korištenja CO₂ zaštitnoga plina, koji ipak ostaje dominantan u području zavarivanja konstrukcijskih čelika zbog komercijalnih i praktičnih razloga. Zbog disocijacije plina CO₂ se stvara vrlo reaktivna smjesa koja je nepravilnom tehnikom rada sklona usisavanju nečistoća iz okolnoga zraka, sagorijevanjem legiranih elemenata te mjestimična oksidiranja taline zavora. Također se može primjetiti da se električni luk ne prekriva u potpunosti sa stupom plazme električnoga luka te su zbog toga prilike za ulazak nečistoća i oksidiranje zavora povećane. Kako bi se ublažio efekt prskanja, preporučeno je smanjiti visinu električnoga luka, čime smanjujemo i napon struje. Time dobivamo ukopani električni luk čiji je vrh elektrode ispod razine vrha taline. Unatoč ograničenjima, pronalaženje pravog seta parametara u kombinaciji sa vještinom zavorivača ovaj proces mogu učiniti industrijski vrlo prikladnim [10].

2.1.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom način je prijenosa metala u električnome luku kojeg karakterizira veliki unos topline pri čemu se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed topline i u obliku malih kapljica, slobodnim padom putuje duž električnoga luka bez da elektroda dodiruje radni komad. Parametri zavarivanja su veći nego kod prethodnih načina prijenosa metala, vrijednosti napona su između 25 V i 40 V, dok je jakost struje između 200 A i 600 A [3, 7].

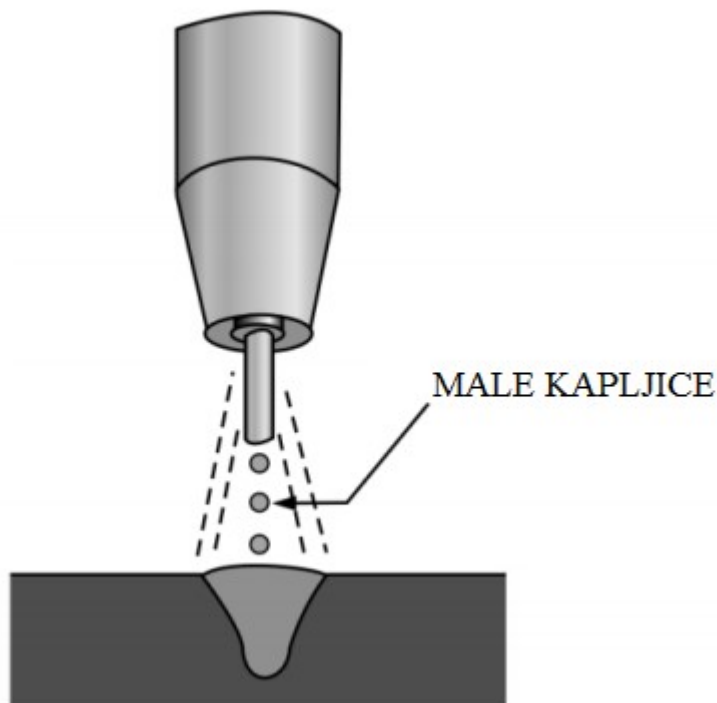
Da bi se postigao način prijenosa metala štrcajućim lukom koriste se plinske mješavine Ar + 1-5 % O₂ i Ar + CO₂ (udio CO₂ mora biti 18 % ili manji). Ovaj prijenos metala se može koristiti kod većine legura uključujući : aluminij, magnezij, ugljični čelik, nehrđajući čelik, legure nikla i bakrove legure [7].

Kod zavarivanja ugljičnih čelika, prijenos metala štrcajućim lukom koristi se pri većim debljinama osnovnih materijala uglavnom za zavarivanje kutnih spojeva i žlijebova. Upotrebom zaštitne atmosfere od 95 % Ar i 5 % O₂ dobiva se duboka penetracija u obliku prsta, dok plinske mješavine koje sadrže više od 10 % CO₂ smanjuju penetraciju i daju zaobljeniji zavar.

Odabir ovoga načina prijenosa metala ovisi o debljini osnovnoga materijala te o mogućnosti pozicioniranja spoja u vodoravni položaj zavarivanja. Izgled gotovoga zavarenoga spoja je

izvrstan i operateri vole raditi ovim načinom prijenosa materijala. Najbolji rezultati se postižu ovim postupkom kada je spoj dobro pripremljen, odmašćen, pobrušen itd.

Slika 5 prikazuje prijenos metala štrcajućim lukom.



Slika 5. Prijenos metala štrcajućim lukom [11]

Prednosti načina prijenosa metala štrcajućim lukom [7]:

- velika vrijednost depozita
- učinkovitost elektrode 98 % ili više
- pogodan za upotrebu širokoga spektra dodatnih materijala kao i jednako velikoga broja promjera elektroda
- odličan izgled zavarenoga spoja
- primamljiv za rad operaterima i jednostavna upotreba
- zahtijeva vrlo malo naknadnoga čišćenja zavora
- vrlo malo nepoželjno rasprskavanje tijekom rada
- izvrsna protaljivost
- upotrebljiv u poluautomatskoj, automatskoj i robotiziranoj izvedbi zavarivanja.

Nedostaci ove vrste prijenosa metala [7]:

- nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima
- puno isparavanja tijekom procesa zavarivanja
- veliko toplinsko zračenje i vrlo svijetli električni luk zahtijevaju dodatnoga zavarivača i promatrača
- pri zavarivanju na otvorenome potrebno koristiti zaštitu od vjetra
- zaštitne atmosfere koje se koriste pri prijenosu metala štrcajućim lukom skuplje su nego 100 % CO₂.

2.1.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Ovaj prijenos naziva se još i visoko kontrolirana varijanta prijenosa materijala štrcajućim lukom. Proces stvaranja kapljice i održavanja električnoga luka isti je kao i kod štrcajućeg luka. U trenutku kada se kapljica treba odvojiti od žice, dodatni uređaj pojačava jakost struje zavarivanja. Djelovanjem veće struje, kapljica prije dolazi u talinu zavora nakon čega vrijednost struje pada na početnu i osigurava stabilnost električnoga luka. Proces se ponavlja u određenim vremenskim razmacima koji se prilagođavaju po potrebi [8].

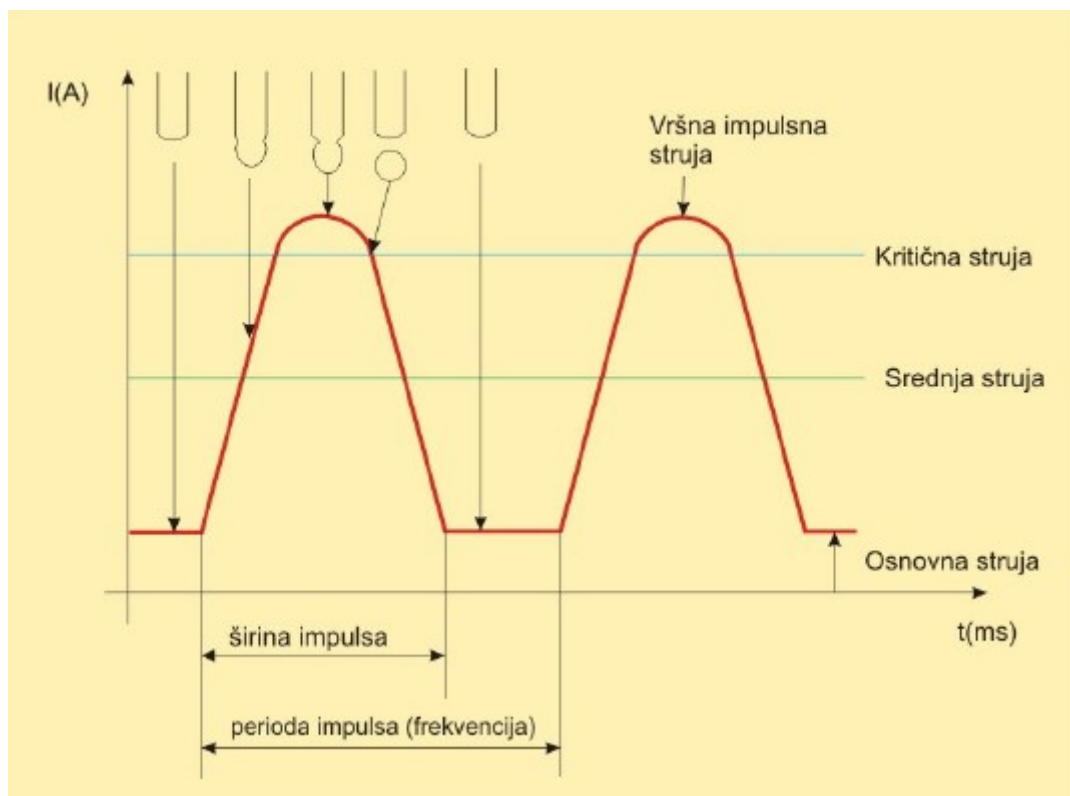
Impulsnim načinom prijenosa kapljica osigurava se stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja kapljica. Daljnje mogućnosti razvoja i primjene postupka omogućili su digitalno upravljani tranzistorski izvori kojima je moguće stvarati impulse proizvoljnoga oblika što znači da je moguće utjecati na način odvajanja i veličinu kapljice. Ovisno o načinu proizvodnje impulsa kod zavarivanja, mogu se koristiti sinusoidalni oblik impulsa, pravokutni oblik te drugi oblici impulsa poput trapeznoga ili trokutastoga. Kod prijenosa impulsnim lukom metal se prenosi bez kratkih spojeva, a najvažnije sile koje utječu na prijenos su elektromagnetska sila i sila površinske napetosti. Upravo je mogućnost upravljanja elektromagnetskom silom omogućilo razvoj impulsnih struja [6].

Ovaj način prijenosa metala razvijen je iz dva glavna razloga, kontrole rasprskavanja tijekom zavarivanja i radi uklanjanja nedovoljnoga protaljivanja svojstvenog prijenosu prijelaznim lukom i kratkim spojevima. Prva primjena ovoga načina prijenosa metala bila je kod zavarivanja trupa broda u prisilnome položaju, a u pitanju je bio niskolegirani osnovni materijal visoke čvrstoće [7].

Postoji pet osnovnih parametara koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk kod impulsnoga zavarivanja [12]:

- 1) Vršna impulsna struja, koja se određuje prema vrsti osnovnoga materijala, promjera žice i mješavine zaštitnoga plina, obično se kreće u granicama od 250 A do 600 A.
- 2) Osnovna struja služi da onemogući gašenje luka nakon prestanka impulsa, podešava se na što manju vrijednost i obično se kreće u granicama od 20 A do 50 A. Veća struja povećava stabilnost, ali i unešenu energiju i dužinu luka.
- 3) Širina impulsa, odabire se tako da omogući odvajanje samo jedne kapljice tijekom trajanja impulsa, kreće se u granicama od 1 do 3 ms.
- 4) Frekvencija je parametar koji ustvari predstavlja broj kapljica u sekundi, a odabire se tako da kod određene brzine žice odvajanje kapljica bude stabilno, podešava se u području od 20 do 300 Hz.
- 5) Brzina žice je parametar kojim određujemo količinu rastaljenoga materijala i kojem je podređeno podešavanje ostalih parametara, zavisno od promjera žice kreće se u granicama od 2 do 15 m/min.

Na slici 6 prikazan je električni impuls i njegovi pripadajući parametri.



Slika 6. Prikaz električnoga impulsa i njegovih pripadajućih parametara [12]

Pored ovih parametara postoji još nekoliko korekcijskih faktora koji se moraju podesiti kako bi se osigurao potpuno stabilan luk i željeni način prijenosa metala. Jasno je da zbog kompleksnosti nije moguće prepustiti zavarivaču podešavanje uređaja pa moderni uređaji za to koriste programske, obično mikroprocesorske jedinice u kojima su pohranjeni podaci o pojedinim parametrima i njihovoj međusobnoj povezanosti u odnosu na materijal i zaštitni plin. Zavarivač nakon odabira ponuđene kombinacije materijala, promjera žice i zaštitnoga plina postavlja samo jedan parametar (obično brzinu žice), a uređaj sve ostalo (impulsnu struju, širinu impulsa, osnovnu struju, frekvenciju, korekcijske faktore). Ovakav način sinkroniziranoga podešavanja parametara u praksi je poznat kao Synergic [12].

Pri ovoj vrsti prijenosa najčešće se koriste pune elektrode promjera 0,8 – 1,6 mm i praškom punjene elektrode promjera 1,1 – 2,0 mm. Moguće je zavarivanje širokoga raspona materijala u što se ubrajaju ugljični i niskolegirani čelici, aluminij, nehrđajući čelici, legure nikla itd. Debljine osnovnih materijala koje se mogu zavarivati ovim načinom prijenosa metala su od 1 mm nadalje. Zaštitni plinovi koji podržavaju prijenos metala impulsnim lukom su argon ili mješavine bogate argonom (kod zavarivanja ugljičnih čelika dodaje se maksimalno 18 % CO₂) [7, 10].

Prednosti impulsnoga načina prijenosa metala [7, 10, 12] :

- primjenjiv u svim položajima zavarivanja
- omogućeno zavarivanje materijala osjetljivih na količinu unosa topline
- rasprskavanje minimalno ili ga uopće nema
- odlična svojstva i izgled zavara
- široki spektar debljina materijala koje se mogu zavarivati
- konstantna visina električnoga luka
- manje toplinske deformacije
- manja količina vodika u zavarenome spoju
- istim promjerom žice moguće zavarivanje različitih debljina materijala
- mogućnost postizanja velikih brzina zavarivanja
- nema potrebe za naknadnom obradom
- prikladan za robotizaciju i mehanizaciju.

Neki nedostaci prijenosa metala impulsnim lukom [7,12]:

- skuplji uređaji za zavarivanje
- plinske mješavine na bazi argona znatno su skuplje
- općenito manja produktivnost u području velikih parametara u odnosu na štrcajući luk
- zbog veće energije električnoga luka potrebna je dodatna zaštita za zavarivače i promatrače
- složeniji elektronički uređaji, mogućnost kvarova opreme.

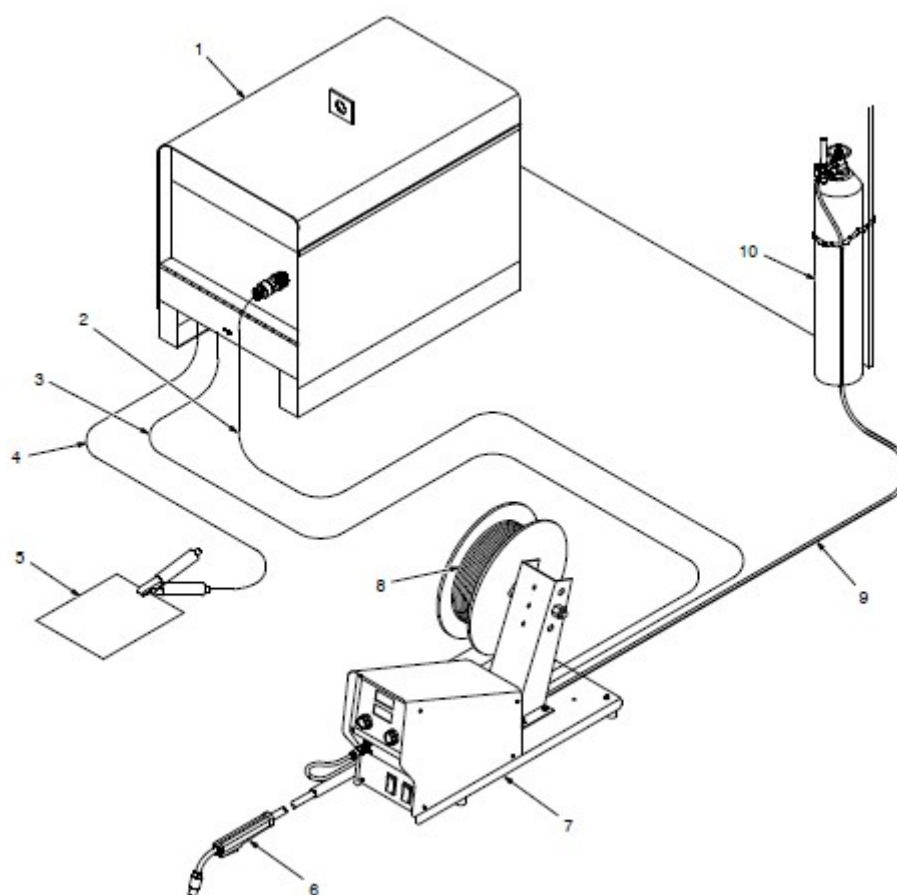
Tablicom 1 prikazana je usporedba impulsnoga načina prijenosa metala sa ostalim vrstama prijenosa.

Tablica 1. Usporedba impulsnoga načina prijenosa metala sa ostalim vrstama [13]

SVOJSTVA/VRSTA LUKA	KRATKI SPOJ	MJEŠOVITI LUK	ŠTRCAJUĆI LUK	IMPULSNI LUK
Rasprskavanje	umjereno	veliko	malo	minimalno
Kvaliteta zavora	lošija	jako loša	odlična	odlična
Unos topline	nizak	veliki	veliki	nizak
Jakost struje	niska/srednja	niska/srednja	srednja	niska/srednja
Količina depozita	srednja	velika	velika	srednja
Brzina zavarivanja	srednja	velika	velika	velika
Stabilnost luka	dobra	jako loša	jako dobra	jako dobra
Produktivnost	mala	mala	velika	velika
Mogućnost uštede	mala	mala	velika	velika
Protaljivanje	dobro	loše	jako dobro	jako dobro
Vještine zavarivača	male	male	velike	male
Svi položaji zavarivanja	da	ne	ne	da

2.2. Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja

Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja sastoji se od: izvora istosmjerne ili izmjenične struje s ravnom statičkom karakteristikom, uređaja za dovod žice, pištolja za zavarivanje, boce sa zaštitnim plinom, regulatora protoka zaštitnoga plina te polikabela. Prikaz opreme dan je na slici 7.



Slika 7. Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja [14]

Oprema sadrži:

- 1) izvor struje
- 2) kabel napajanja za kontakti uređaj
- 3) kabel uređaja za dovod žice
- 4) priključak mase
- 5) radni komad
- 6) pištolj za zavarivanje
- 7) uređaj za dovod žice
- 8) kolut sa žicom
- 9) dovod plina
- 10) boca sa zaštitnim plinom.

2.2.1. Izvor struje za zavarivanje

Glavni dio opreme za zavarivanje je izvor struje. Njegova zadaća je osiguravanje dobre uspostave električnoga luka i održavanje njegove stabilnosti. Ovisno o kapacitetu strojeva, snaga im se može kretati u rasponu od 40 do 600 A te od 10 do 40 V [15]. Jedan takav karakteristični uređaj za MIG/MAG zavarivanje prikazan je slikom 8.



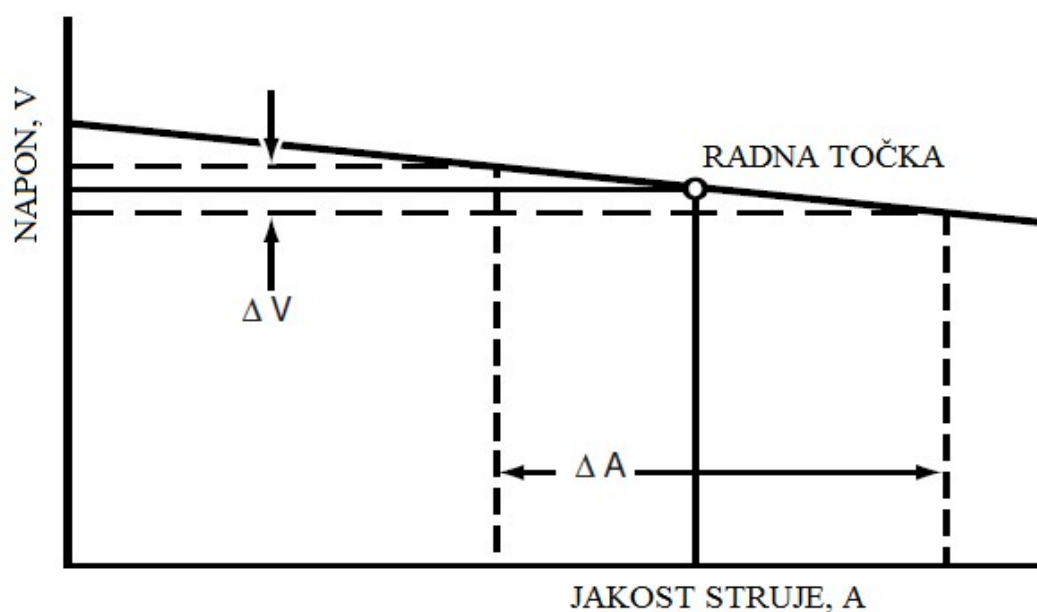
Slika 8. Uređaj za MIG/MAG zavarivanje [15]

Kako bi se dobio stabilni električni luk, izvor struje mora imati prikladno postavljenu ili podesivu karakteristiku i izlaz za odgovarajuće vrijednosti induktiviteta. Pri tome važnu ulogu imaju odnos jakosti struje i napona zavarivanja, što se još naziva i statička karakteristika izvora struje. Uobičajeni izvori struje imaju strmopadajuću statičku karakteristiku dok se kod MIG/MAG postupka uglavnom koristi ravna statička karakteristika [16].

Kad se žica dobavlja konstantnom brzinom pri ovome postupku jednostavnije je osigurati odgovarajuće uvjete zavarivanja korištenjem izvora struje konstantnoga napona. Ako je duljina električnoga luka kraća od postavljene vrijednosti tj. ako se smanji vrijednost napona, jakost struje će se automatski naglo povećati i žica će se staljivati većom brzinom od one kojom se dobavlja.

U suprotnome, ako se duljina električnoga luka poveća, jakost struje će se automatski smanjiti i žica će biti dovođena u električni luk brže nego što se može istaliti. To govori da je luk održan konstantnim čak i kad se udaljenost između sapnice i radnoga komada mijenja te u slučajima nepravilnoga držanja pištolja. Još jedna prednost izvora struje konstantnoga napona je smanjeni rizik od izgaranja elektrodne žice unutar kontaktne cjevčice [16].

Na slici 9 prikazana je ravna statička karakteristika izvora struje.



Slika 9. Prikaz ravne statičke karakteristike izvora struje [7]

2.2.2. Sustav za dovod žice

Svrha sustava dobave žice je osigurati ravnomjerno, konstantno i pouzdano dovođenje žice do električnoga luka. Vrlo je važno da žica bude vođena precizno i ujednačeno jer bilo kakva promjena brzine dobavljanja žice može rezultirati promjenom u zavarenome spoju. I najmanja promjena ili titranje žice može dovesti do pogrešaka u zavaru pa čak i do prestanka dodavanja žice [15].

Izvedbe dodavača žice pružaju primjenu širokoga raspona promjera žica (0,6 – 1,6 mm), i punih i praškom punjenih. Brzina dodavanja žice može biti postavljena putem digitalnih očitavanja ili kalibrirajućega sustava obilježavanja na upravljačkoj ploči [7].

Na slici 10 prikazan je uređaj za dodavanje žice.



Slika 10. Uređaj za dodavanje žice [17]

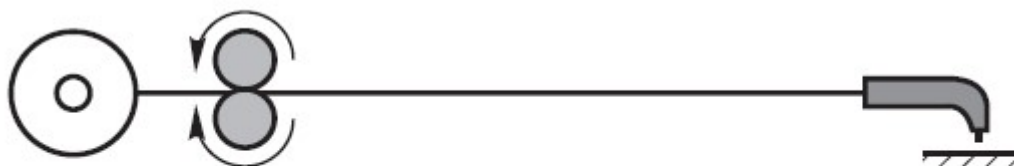
Dodavač žice se može nalaziti unutar kućišta izvora struje za zavarivanje čime se želi dobiti manji volumen uređaja, veća mobilnost i ušteda cijene proizvodnje. Danas se dodavači žice većinom montiraju van kućišta kao zasebna jedinica zbog prednosti poput rotacije modula s obzirom na izvor struje za zavarivanje (vrlo korisno kod većih radnih komada sa više stranica kojima je pristup otežan). Bolja preglednost namotaja žice na kolutu u slučaju pogreške pri uvođenju [10].

Za dodavanje žice najčešće se koriste dva načina [18]:

- 1) *push* sustav - žica se kontroliranom brzinom gura pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu žice u gorioniku do samoga mjesta zavarivanja, kontrolirana brzina osigurava se elektronički reguliranim istosmjernim motorom, siguran pogon osigurava se sa dva ili četiri pogonska kotačića koji žicu vode i guraju kroz kalibrirane utore čije dimenzije i oblik ovise o materijalu i promjeru žice, ovaj način omogućava efikasni rad sa žicama promjera 0,6 – 2,4 mm za čelike, 1,2 – 2,4 mm za aluminij i njegove legure, dodavanje žice guranjem omogućava sigurno dodavanje na udaljenostima tri do četiri metra od izvora i danas se najčešće koristi u praksi

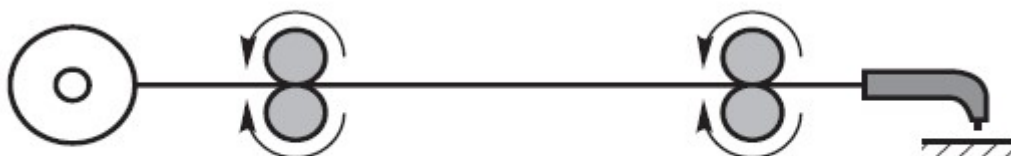
- 2) *push - pull* sustav – žica se kontroliranom brzinom gura pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu žice do pogonskih kotačića u gorioniku koji ih vuče do mjesta zavora, u ovom slučaju drugi pogonski motor se nalazi u ručki gorionika, a po svojoj izvedbi može biti električni ili zračni, prednost ovoga sustava je stalna zategnutost žice u vodilici što omogućava sigurno dodavanje i kod žica manjih promjera (0,8 mm) i na udaljenostima do 15 m od izvora, mana sustava je njegova cijena i težina sustava gorionik/kabel, osobito kod većih struja i udaljenosti, stoga se on danas koristi uglavnom kod zavarivanja aluminija i njegovih legura na konstrukcijama gdje druga rješenja nisu moguća.

Na slici 11 prikazana je dobava žice *push* sustavom.



Slika 11. Dobava žice *push* sustavom [16]

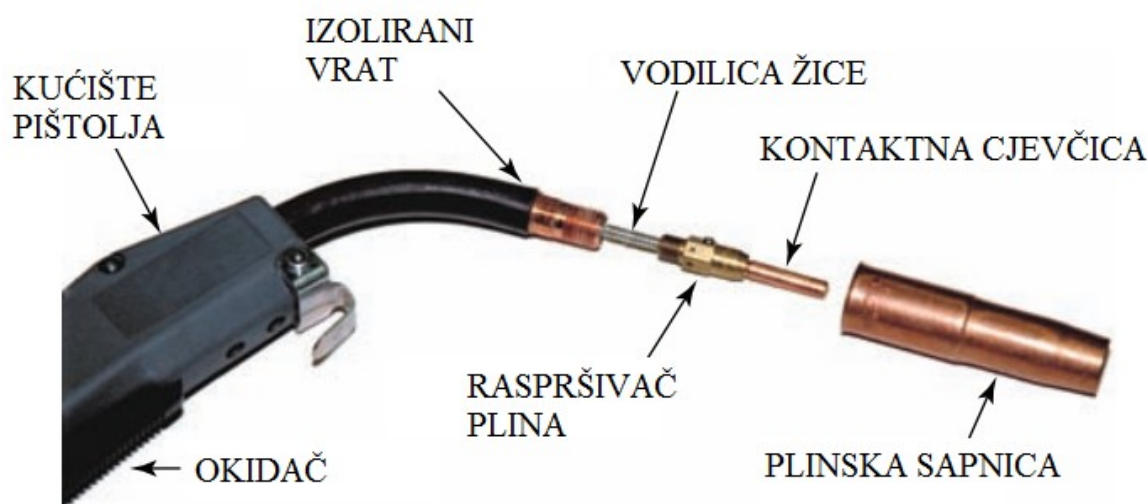
Na slici 12 prikazana je dobava žice *push – pull* sustavom.



Slika 12. Dobava žice *push – pull* sustavom [16]

2.2.3. Pištolj za zavarivanje

Pištolj za MIG/MAG zavarivanje osigurava dovodjenje struje zavarivanja, zaštitnoga plina te dodatnoga materijala do mjesta zavarivanja. Njegov vrh se nalazi u samoj blizini električnoga luka, što znači da je konstantno izložen vrlo velikim toplinskim i mehaničkim naprezanjima. Za struje zavarivanja 150 – 500 A proizvode se pištolji bez posebnoga hlađenja dok se za struje 250 – 600 A proizvode i pištolji hlađeni vodom. Glavni dio pištolja je njegovo kućište koje je napravljeno od toplinski otporne plastike. Povezano je sa krajem polikabela. Ostali dijelovi koji čine pištolj su okidač, vrat pištolja, vodilica žice, kontaktna cjevčica, raspršivač plina te plinska sapnica [7, 15, 18]. Na slici 13 prikazan je pištolj za MIG/MAG zavarivanje.



Slika 13. Pištolj za MIG/MAG zavarivanje [15]

U većini situacija prije samoga zavarivanja potrebno je odabrati odgovarajući pištolj koji će zadovoljiti razinu udobnosti potrebnu zavarivaču i istovremeno ispuniti zahtjeve trošenja nametnutih uvjetima zavarivanja. Struja zavarivanja kojom se radi primarni je kriterij odabira veličine pištolja, a još u obzir dolazi izdržljivost pištolja u uvjetima koje postavlja električni luk zavarivanja. Dok se pištolji hlađeni zrakom više preporučuju zbog jednostavnosti, oni hlađeni vodom su kompaktniji. Pištolji mogu imati ravne ili zakrivljene sapnice, a opet je na operateru izbor koju će odabrati, u ovisnosti o uvjetima u kojima će se zavarivati [7, 15].

2.3. Zaštitni plinovi za MIG/MAG postupak zavarivanja

Izbor odgovarajućega zaštitnoga plina igra ključnu ulogu u kvaliteti zavarenoga spoja. Primarni zadatak plinske zaštite je šticeenje rastaljenoga metala od nepovoljnoga djelovanja okolnoga zraka te osiguravanje optimalnih radnih uvjeta električnoga luka. Dodirom taline zavara s okolnim zrakom i prisutnima kisikom i dušikom dolazi do stvaranja oksida i nitrida koji se uključuju u zavareni spoj i oslabljuju svojstva zavara.

Kriterij koji se koristi za izbor zaštitnoga plina uključuje slijedeće [7]:

- vrsta dodatnoga materijala
- željena mehanička svojstva metala zavara
- stanje osnovnoga materijala (korozijska, prevlake, masnoće)
- priprema spoja
- vrsta prijenosa metala u električnome luku
- cijena zaštitnoga plina.

Najčešće upotrebljavani zaštitni plinovi za MIG/MAG zavarivanje su ugljikov dioksid, argon i helij. Uglavnom se radi sa njihovim mješavinama kako bi se dobila najbolja izvedba zavarenoga spoja. Ponekad se spomenutim mješavinama još mogu dodati male količine kisika, vodika ili dušika. Za zavarivanje željeznih legura najviše se koriste ugljikov dioksid, argon sa 2 – 5 % kisika te argon sa 25 % ugljikova dioksida. Obojeni metali se zavaruju u zaštitnim atmosferama argona, helija ili njihovih mješavina [15].

2.3.1. Svojstva pojedinih zaštitnih plinova

Argon (Ar) inertni zaštitni plin. Inertni plinovi ne reagiraju ni sa jednim drugim tvarima i netopivi su u rastaljenome metalu. Zbog veće gustoće od zraka učinkovito štiti područje zavarenih spojeva tako što ga potiskuje dalje od same zone. Relativno se lako ionizira, a oni plinovi koji se lakše ioniziraju podržavaju duge električne lukove na manjim naponima, čineći ih manje osjetljivijima na promjene duljine. Podržava prijenos metala štrcajućim lukom. Legure nikla, bakra, aluminija, titana i magnezija koriste stopostotnu argonsku plinsku zaštitu [7, 15].

Helij (He) se najčešće dodaje plinskim mješavinama za primjenu kod nehrđajućih čelika i aluminija. Ima veliku toplinsku vodljivost što za posljedicu ima profil zavora koji je širi, ali ima manju penetraciju. Zahtijeva veći napon zavarivanja kako bi se luk održao stabilnim, a i skuplji je u odnosu na argon [7].

Ugljikov dioksid (CO_2) je inertan na sobnoj temperaturi. U prisutnosti električnoga luka i taline zavora postaje reaktivan. Stopostotni ugljikov dioksid se obilato koristi kao zaštitni plin pri zavarivanju čelika. Osigurava veće brzine zavarivanja, bolju penetraciju i dobra mehanička svojstva, a jeftiniji je od inertnih plinova. Glavne mane njegove upotrebe su manje stabilna karakteristika luka i znatno rasprskavanje. To se može smanjiti na minimum održavanjem kraćega električnog luka. CO_2 može dati dobre zavora korištenjem dodatne žice koja sadrži dezoksidante [15].

Kisik (O_2) je oksidans koji reagira sa sastojcima u talini i tvori okside. U malim dodacima (1 - 5 %) u ravnoteži argona daje dobru stabilnost električnoga luka i dobar izgled spoja. Upotreba dezoksidanata u dodatnome materijalu nadoknađuje posljedicu upotrebe kisika [7].

Vodik (H_2) se u malim postotcima (1-5 %) dodaje argonu pri zavarivanju nehrđajućih čelika ili niklovih legura. Omogućava korištenje većih brzina zavarivanja, ali postoji visoki rizik od poroznosti [7].

Dušik (N_2) nije inertni plin, ali relativno ne reagira sa rastaljenim metalom. Ponekad se koristi u mješavinama kako bi se povećala temperatura u električnome luku [15].

3. ROBOTSKE STANICE ZA MIG/MAG ZAVARIVANJE

Industrijski roboti i mehanizirana oprema su postali neophodni u području zavarivanja u proizvodnji okrenutoj ka velikoj proizvodnosti jer ručno zavarivanje daje niske stope proizvodnje uslijed nepogodne radne okoline i ekstremnih fizičkih zahtjeva. Dinamično stanje tržišta i jaka konkurencija potiču proizvodne tvrtke na pronalazak optimalnih proizvodnih postupaka. Prema nekim istraživanjima, robotizirana proizvodnja ostvaruje najniže troškove po komadu kod malih i srednjih proizvodnih količina u usporedbi sa ručnom i automatiziranom izvedbom. Uz konkurentne troškove po proizvodnoj jedinici robotizirani sustavi zavarivanja donose još neke prednosti, kao što su bolja produktivnost, sigurnost, kvaliteta zavora, fleksibilnost, iskorištenje radnoga prostora i niži troškovi rada.

Porast mogućih primjena robotiziranoga zavarivanja dovodi do potrebe za smanjenjem unosa podataka u sustav od strane operatera te za poboljšanjem automatske kontrole parametara zavarivanja, putanje kretanja robota, otkrivanja grešaka i njihovim ispravljanjem. Iako je razina složenosti i profinjenosti takvih robotskih sustava vrlo visoka, njihova sposobnost prilagodbe promjenama u stvarnome vremenu, u okolišnim uvjetima, ne može izjednačiti sposobnosti ljudskih osjetila da se prilagode uvjetima zavarivanja [19].

Prednosti robotiziranoga zavarivanja razlikuju se od procesa do procesa, ali zajedničke prednosti općenito uključuju bolju kvalitetu zavarenih spojeva, povećanu produktivnost, smanjene troškove zavora i povećanu ponovljivost procesa zavarivanja.

Kako je zavarivanje sastavni dio napredne industrijske proizvodnje, tako se robotizirano zavarivanje smatra glavnim simbolom suvremene tehnologije zavarivanja. U najranijim primjenama zavarivanja potpomognutoga robotima, takozvanim prvim generacijama robotskih zavarivačkih sustava, zavarivanje se provodilo tehnikom dva prolaza, gdje je prvi prolaz namijenjen učenju geometrije spoja nakon čega je slijedilo stvarno praćenje i zavarivanje spoja u drugome prolazu. Razvojem tehnologije došlo je do pojave druge generacije robotiziranih sustava koji su pratili geometriju spoja u stvarnome vremenu i istovremeno izvodili fazu učenja i praćenja spoja. Najnovija tehnologija na području robotiziranoga zavarivanja predstavlja treću generaciju sustava, koji ne samo da rade u stvarnome vremenu, već su također sposobni učiti geometriju spoja koja se jako brzo mijenja za vrijeme rada u nestrukturiranim okruženjima [19].

3.1. Roboti za elektrolučno zavarivanje

Elektrolučno i elektrootporno točkasto zavarivanje su bili među najranijim postupcima na kojima je robotika ostvarila svoju primjenu, a zavarivanje kao tehnologija je i danas jedno od područja koja se nalaze u samome vrhu po brojnosti primjene industrijskih robota. Glavna razlika između dva navedena postupka s obzirom na robota koji izvršava radnju je rukovanje. Dok robot za elektrootporno točkasto zavarivanje mora doći na točno određeno mjesto, robot za elektrolučno zavarivanje također mora izvršiti precizno kretanje kontinuiranom putanjom pištolja za zavarivanje koji se nalazi na završetku robotske ruke. Popratna oprema kao što su višeosni pozicioneri dodaje se običnoj robotskoj stanici za elektrolučno zavarivanje tvoreći tako višeosne robotske stanice. Takvi zavarivački roboti danas rade poprilično dobro u serijskoj proizvodnji gdje proces zavarivanja i radni komad mogu biti optimizirani unutar uskih tolerancija [20]. Slikom 14 prikazan je robot za elektrolučno zavarivanje.



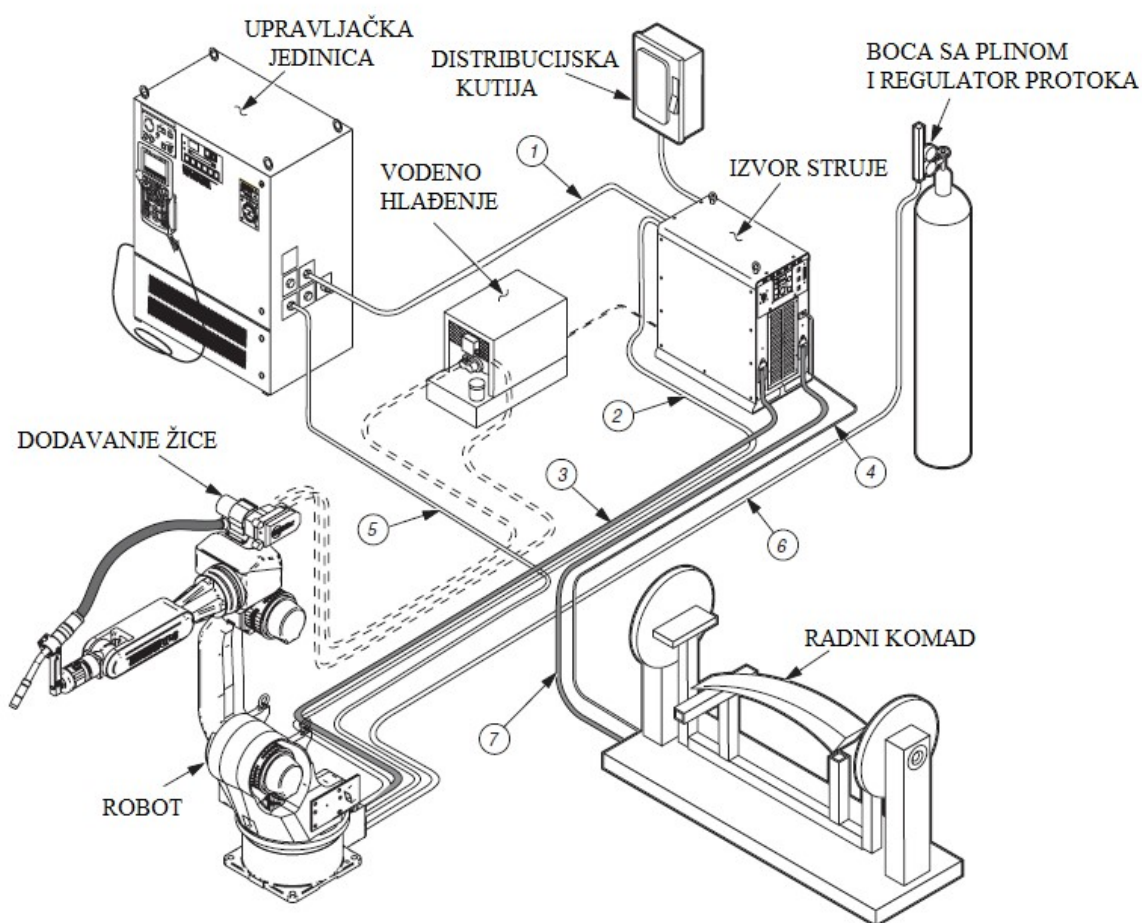
Slika 14. Robot za elektrolučno zavarivanje [21]

Međutim, kada se radi o fleksibilnijoj proizvodnji, proizlazi da je elektrolučno zavarivanje složeniji proces sa mnogo međusobno povezanih parametara koji se ponekad protive jedni drugima i koji su povezani sa mnogim aktivnostima u proizvodnji zavarenih konstrukcija uključujući projektiranje, izbor materijala, odabir postupka zavarivanja itd. U ovome je kontekstu važno promotriti stanicu za robotizirano zavarivanje kao jednu cjelovitu jedinicu, gdje se optimizaciji kontroliranih parametara mora pristupiti sa holističkoga gledišta [20].

3.2. Konfiguracije robotskih stanica za MIG/MAG zavarivanje

Broj robotskih stanica za elektrolučno zavarivanje bilježi veliki porast. Dvije najučestalije stanice koje se javljaju u industrijskim pogonima su stanice za MIG/MAG i TIG postupak zavarivanja. Najčešće se javljaju iz razloga što se mogu vrlo lako povezati sa robotskim sustavom. Glavni dijelovi stanice za robotizirano zavarivanje su robotski manipulator (ruka), upravljačka jedinica robota, oprema za elektrolučno zavarivanje, jedinice za pozicioniranje, senzori te sigurnosna oprema [22].

Slika 15 prikazuje robotsku stanicu za MIG/MAG postupak zavarivanja.



Slika 15. Robotska stanica za MIG/MAG postupak zavarivanja [23]

Popis kablova robotske stanice za MIG/MAG zavarivanje:

- 1) kontrolni kabel napajanja
- 2) kontrolni kabel uređaja za dovod žice
- 3) kabel izvora struje (+)
- 4) kabel senzora električnoga luka
- 5) kabel senzora udara
- 6) crijevo za dovod plina
- 7) kabel izvora struje (-).

Glavni dio svake stanice za zavarivanje je robotski manipulator (ruka). Sastoji se od niza međusobno povezanih dijelova i zglobova sličnih onima koji se nalaze i kod ljudske ruke. Zglobovi povezuju dva dijela i omogućuju im međusobno relativno gibanje. To gibanje može biti ili pravocrtno ili rotacijsko. Ljudski mišići osiguravaju silu koja pokreće razne zglobove u tijelu, slično tome roboti koriste pogone za upravljanje ruke po programiranim putanjama, a kada dođu u konačnu točku svojega kretanja tada im osiguravaju potrebnu krutost. Najčešće se upotrebljavaju električni i hidraulički pogoni, a ponekad i pneumatski [24]. Slika 16 prikazuje robotski manipulator za MIG/MAG zavarivanje.



Slika 16. Robotski manipulator za MIG/MAG zavarivanje [25]

Robotski manipulatori se mogu razlikovati međusobno prema broju stupnjeva slobode gibanja, veličini radnoga prostora u kojemu mogu raditi, a time i prema veličini radnoga komada kojega mogu zavarivati. Još se razlikuju i po maksimalnoj nosivosti koja može biti ograničavajući faktor kada je u pitanju izbor pištolja za zavarivanje. Većina robotskih manipulatora namijenjena je ili za posao zavarivanja ili za posao pozicioniranja i posluživanja drugih robotskih manipulatora, dok ih jako malo može biti korišteno u obje svrhe [26].

Na slici 17 prikazane su različite izvedbe robotskih manipulatora za zavarivanje.



Slika 17. Različite izvedbe robotskih manipulatora za zavarivanje [27]

Upravljačka jedinica robota je mozak stanice za robotizirano zavarivanje. To je iz razloga što upravljačka jedinica pohranjuje programirane podatke o gibanju robota i podatke o elektrolučnome zavarivanju te izvodi potrebna preračunavanja koristeći visokobrzinski mikroprocesor. Upravljačka jedinica šalje signal pogonima i motorima programiranjem pozicije, brzine i drugih parametara te ostalim podacima dobivenim od raznih senzora. Upravljačka jedinica ne služi samo za upravljanje samim robotom, već i drugim, popratnim uređajima kao što su pozicioneri i slično. Bez simultanoga upravljanja integrirane upravljačke jedinice ne bi bilo moguće izvoditi zavarivanje radnih komada složene geometrije. Pomoćni memorijski uređaji kao USB memorija se preporučavaju za pohranu važnih podataka kao osiguranje u slučaju kvara upravljačke jedinice. U slučaju problema sa napajanjem ili nekim drugim nepredviđenim okolnostima pohranom podataka iz koda u upravljačku jedinicu osigurat će da robot ostvari programiranu poziciju bez vraćanja u stanje nulte konfiguracije [22].

Na slici 18 prikazani su upravljačka jedinica i privjesak za učenje.



Slika 18. Upravljačka jedinica i privjesak za učenje [28]

Upravljačke jedinice se međusobno razlikuju po dimenzijama, priključnoj snazi, kapacitetu memorije te načinu komunikacije sa korisnikom (privjesak za učenje, programiranje pomoću računala).

Kod robotiziranoga zavarivanja izvor struje za zavarivanje zapravo je vrlo sličan izvoru struje kakav se koristi kod ručnoga postupka zavarivanja. Međutim, kod robotskoga zavarivanja izvor struje je povezan s upravljačkom jedinicom čime je omogućena neprekidna komunikacija, konfiguracija i kontrola parametara zavarivanja. Svi se parametri zavarivanja unose preko upravljačke jedinice (npr. privjesak za učenje), čime se značajno olakšava programiranje iznimno zahtjevnih postupaka zavarivanja. Osim toga u sustav je integriran nadzor parametara zavarivanja i upravljanja listama pogrešaka [26].

Izvori struje zavarivanja međusobno se razlikuju prema jakosti struje zavarivanja koju mogu dostaviti, intermitenciji, vrsti postupka za koji su namijenjeni i vrsti pištolja za zavarivanje (zračno ili vodeno hlađenje pištolja). Osim toga mogu se razlikovati i po količini parametara koje korisnik može sam mijenjati [26].

Na slici 19 prikazani su izvori struje za robotizirano zavarivanje.



Slika 19. Izvori struje za robotizirano zavarivanje [29]

Kako bi se zavarivanje na robotskoj stanici uspješno izvršilo pojedinačni dijelovi moraju biti točno postavljeni i sigurno učvršćeni na mjestu. Tada je važno razmotriti izvedbu steznih naprava koje će držati pojedinačne dijelove u odgovarajućem položaju. Naprava mora osiguravati brzo i jednostavno postavljanje, mora držati dijelove u točnome položaju za vrijeme zavarivanja i mora omogućiti neometani pristup zavarivačkoga pištolja svakoj točki zavara [30].

Početna naprava za pozicioniranje radnoga komada pri robotiziranome zavarivanju može biti ista ona koja se koristi i kod ručnoga zavarivanja, no danas postoje specijalizirani pozicioneri koji poboljšavaju svestranost i raspon sustava za robotsko zavarivanje. Upotrebljiva količina radnoga prostora robota može biti ograničena zbog načina postavljanja pištolja za zavarivanje čime se onemogućuje prikladan pristup spoju. Posebni pozicioneri uklanjaju neka od ovih ograničenja na način da učine radni komad pristupačnijim za zavarivački pištolj [30].

Pozicioneri koji se koriste pri robotskim stanicama moraju biti točniji od onih koji se koriste pri ručnome ili poluautomatskome zavarivanju. Dodatno, pozicioner mora biti moguće upravljati od strane jedinice za upravljanje kako bi se osiguralo simultano gibanje nekoliko osi za vrijeme zavarivanja.

Međutim, postavljanje i skidanje radnih komada sa pozicionera robotskih stanica može biti dugotrajno i nepraktično. Ponekad je učinkovitije imati dvije ili više steznih naprava na okretnome pozicioneru unatoč višoj početnoj cijeni. Sa okretnim stolom na primjer, operater može postavljati i skidati dijelove za vrijeme zavarivanja. To ubrzava proces i održava robota u radu što je duže moguće [30].

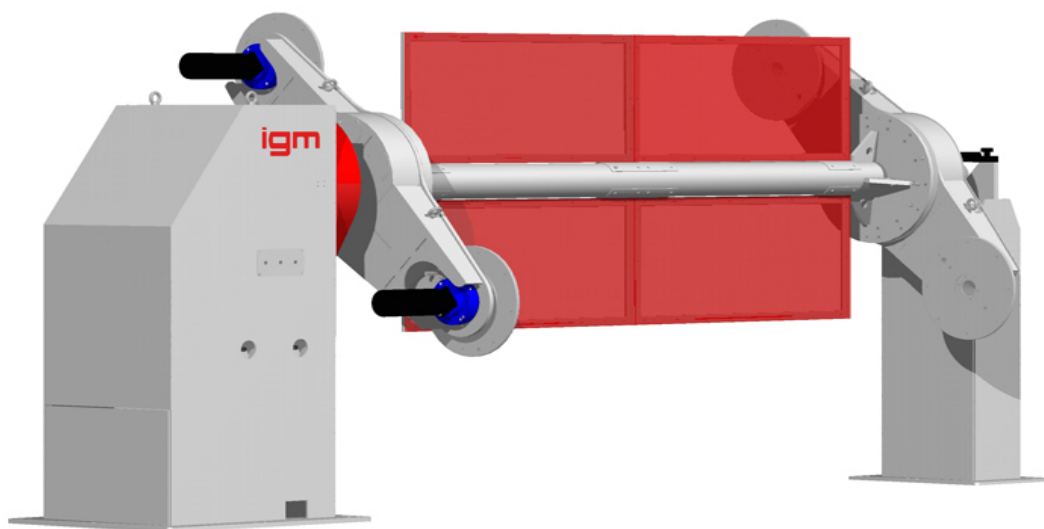
Sljedeće slike prikazuju neke vrste pozicionera koje se najčešće koriste u sklopu robotskih stanica za zavarivanje.

Na slici 20 prikazan je jednostruki robotizirani okretni pozicioner.



Slika 20. Jednostruki robotizirani okretni pozicioner [31]

Na slici 21 prikazan je dvostruki robotizirani okretni pozicioner.



Slika 21. Dvostruki robotizirani okretni pozicioner [31]

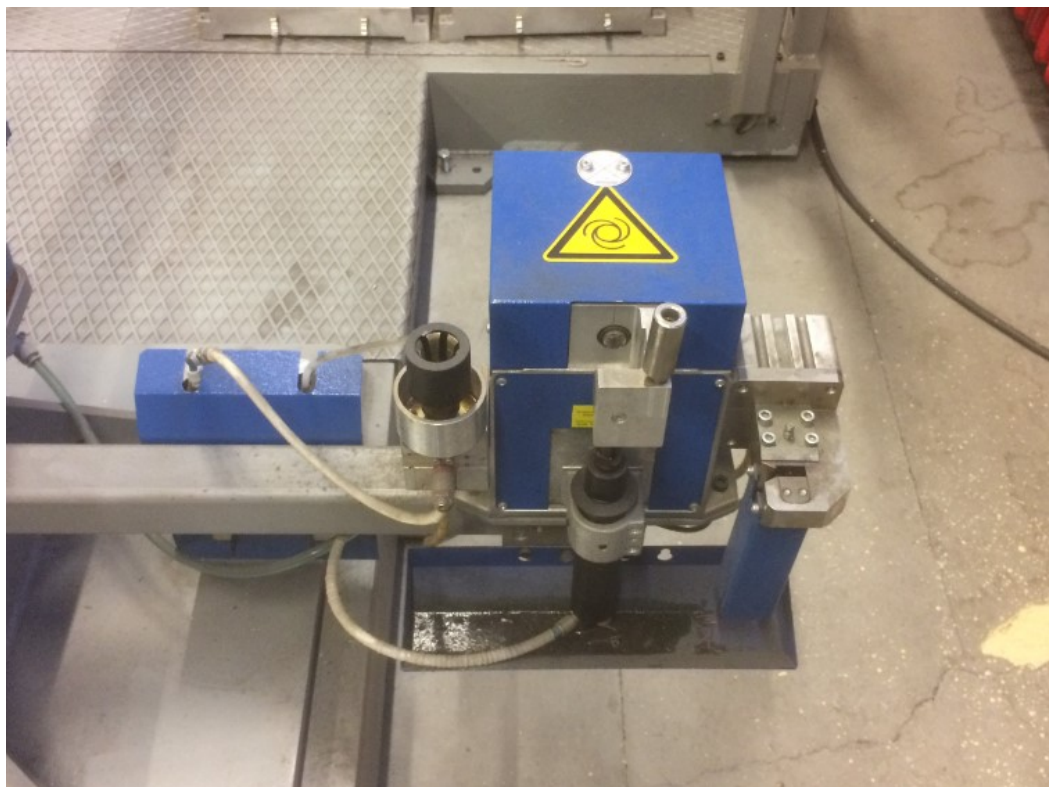
Na slici 22 prikazan je robotizirani okretno – nagibni pozicioner.



Slika 22. Robotizirani okretno – nagibni pozicioner [32]

Najveće opterećenje kod stanica za robotizirano zavarivanje snosi pištolj za zavarivanje. Izložen je utjecaju topline, rasprskavanju kapljica kod zavarivanja te u najgorem slučaju sudarima. Zavarivački pištolji su projektirani za takve radne uvjete, ali trebaju redovito čišćenje, mjerenje i utvrđivanje nul točke alata kako bi kvaliteta zavarivanja i točnost bili zadovoljavajući. Kako bi bio osiguran slobodni protok zaštitnoga plina i kako bi se izbjegla pojava poroznosti u zavaru potrebno je izvoditi povremena čišćenja pištolja za zavarivanje. Iz toga razloga je kod robotskih stanica za zavarivanje uveden posebni sustav za čišćenje pištolja (Slika 23). Sustav omogućava izvođenje triju radnji, čišćenja sapnice, nastrcavanja tekućine protiv naljepljivanja kapljica te rezanje žice [33].

Robot prilazi sustavu za čišćenje pištolja, potom uvodi pištolj u cilindar u kojem se nalazi rotirajući razvrtač koji skida sve zalijepljene kapljice metala i ostale prljavštine unutar sapnice. Zatim se pištolj vodi do mjesta gdje se ubrizgava tekućina koja sprječava prijevremenu pojavu naljepljivanja kapljica unutar sapnice koja može dovesti do prekida dovoda žice, zaštitnoga plina ili kratkoga spoja čime bi pištolj bio beskoristan. Proces završava trećom stavkom gdje se reže žica i nakon toga se nastavlja prethodna operacija. Ciklus čišćenja pištolja se automatski aktivira u onim intervalima u kojima je programiran.



Slika 23. Sustav za čišćenje pištolja i rezanje žice

3.3. Senzori kod robotiziranoga zavarivanja

Roboti za zavarivanje su jako zastupljeni u automatiziranim proizvodnim pogonima među kojima većina koristi robote temeljene na pristupu nauči i ponovi, što zahtijeva dosta vremena za uvježbavanje i projektiranje putanje. Osim toga, učenje i programiranje se mora ponoviti u slučaju promijenjenih dimenzija radnih komada jer se ne mogu ispraviti samostalno za vrijeme procesa zavarivanja. Položaj spoja u praksi obično se promijeni uslijed različitih problema. Upotrebom senzora ovi problemi kod robotiziranoga zavarivanja mogu se izbjeći. Glavni zadatak senzora kod robotskoga zavarivanja je otkriti i izmjeriti značajke i parametre procesa kao što su geometrija spoja, mjesto i geometrija zavarivačkoga bazena te online nadzor procesa zavarivanja. Senzori se dodatno koriste za ispitivanje grešaka i procjenu kvalitete. Idealni senzor za primjenu kod robota trebao bi biti u stanju mjeriti i detektirati odstupanja u putanji zavarivanja, prijevremeno identificirati kutni spoj, sudar, početnu i krajnju točku zavara te bi trebao biti što manjih dimenzija [19].

Senzori kod robotiziranoga zavarivanja općenito se mogu podijeliti na senzore za mjerenje tehnoloških parametara i senzore za praćenje geometrije zavara. Geometrijski orijentirani senzori pružaju robotu potrebne podatke koji omogućuju uspješno praćenje žlijeba. To omogućava izmjenu predprogramirane putanje robota sukladno geometrijskim odstupanjima. Tehnološki senzori mjere parametre procesa zavarivanja radi njegove stabilnosti i najčešće su korišteni u svrhu nadgledanja i kontrole [34].

3.3.1. Senzori za mjerenje tehnoloških parametara

U ovome dijelu su opisani senzori koji mjere tehnološke parametre kao što su napon, jakost struje i brzina dodavanja žice.

3.3.1.1. Mjerenje napona

Mjerenje napona bi trebalo izvoditi što je više moguće bliže električnome luku. Struja se dovodi žici preko kontaktne cjevčice i to se mjesto smatra povoljnim za izvođenje mjerenja. Međutim, postoji pad napona između kontaktne cjevčice i vrha žice gdje luk započinje u iznosu od 0,3 V ovisno o svojstvima procesa. U praksi je, u pogonskim uvjetima vrlo teško izmjeriti točni napon električnog luka. Bolji i pouzdaniji način mjerenja je mjerenje napona na

žici unutar sustava za dobavu žice. Treba napomenuti da se mjerenja vrše unutar okoline u kojoj vladaju velike struje, obično u rasponu od 150 do 500 A.

U slučaju da su žice senzora pogrešno postavljene može doći do značajnih induciranih napona pri čemu se dobivaju greške prilikom očitavanja rezultata mjerenja [34].

3.3.1.2. Mjerenje jakosti struje

Postoje dvije vrste senzora za mjerenje struje zavarivanja, promjena struje (eng. Current Shunt) i Hallov efekt [34].

- a) promjena struje – izvodi se tako da se kroz otpornik pusti struja i mjeri pad napona kroz njega. Glavni nedostatak ove metode je taj što je signal napona malen i osjetljiv na buku.
- b) senzor na principu Hallovog efekta – sastoji se od kružne jezgre od lijevanog željeza kroz koju prolazi kabel kojim teče struja. U međuprostoru unutar jezgre nalazi se i sam uređaj za mjerenje, a sačinjava ga pločica od dopiranoga silicija s dva para vodiča. Prvi par opskrbljuje pločicu s namještenom jakosti struje, a uređaj reagira signalom na drugom paru. Dobiveni signal proporcionalan je magnetskom polju, a time i jakosti struje vodiča u polju. Prednost ovog senzora je što nema kontakta s vodičem i prema tome nema interferencije sa strujom iz izvora za zavarivanje. Ograničen je s propusnosti od 100 kHz, a uobičajena brzina odziva je 50 A/ μ s.

3.3.1.3. Mjerenje brzine dovođenja žice

Brzina dovođenja žice je značajni parametar koji se mora kontrolirati kako bi se ostvario stabilni proces zavarivanja. Izvor struje za zavarivanje je u većini slučajeva reguliran tako da daje konstantni napon te su parametri koje se unaprijed podešava obično napon i jakost struje. Međutim, u stvarnosti, struja predstavlja određenu brzinu dobave žice i obično se radi tako da se primijene konstantna vrijednost napona i brzine dovođenja žice te da se na osnovu toga struja sama podesi. Održavanjem vrijednosti brzine dovođenja žice jednakoj nominalnoj postiže se tražena stabilnost procesa [34].

Kod većine robota sustav za dovođenje žice nalazi se postavljen na robotskoj ruci. Međutim, u nekim slučajevima pogon se nalazi na većoj udaljenosti pa može u nekim dijelovima dovoda doći do nepoželjnoga savijanja žice uslijed nedovoljne napetosti i na taj način poremetiti brzinu dovođenja žice, a time i jakost struje te učiniti proces nestabilnim.

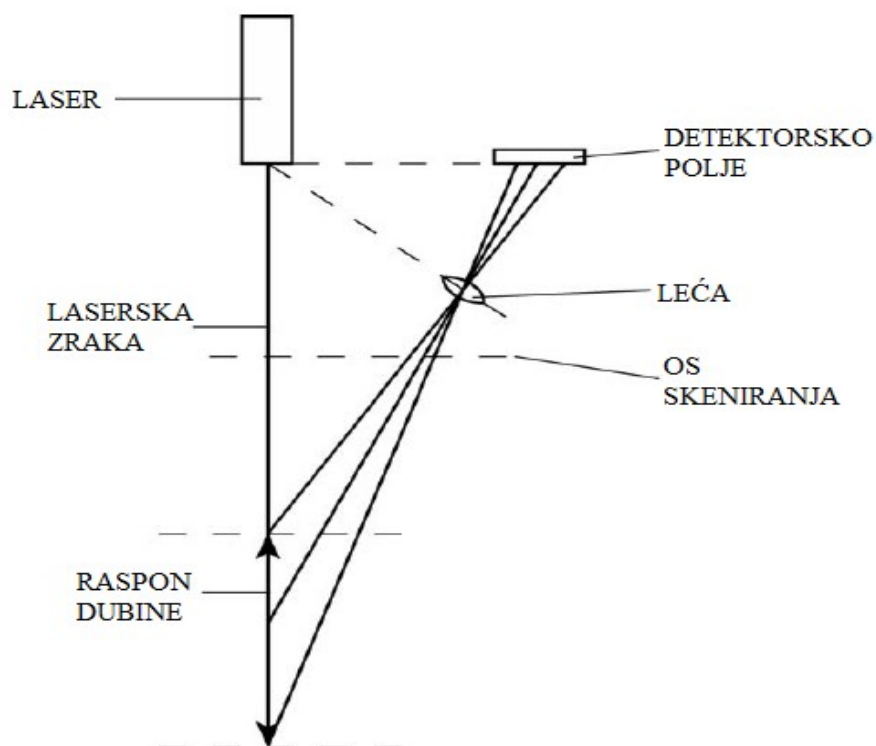
U laboratorijskim je uvjetima moguće mjeriti brzinu dovoda žice na kontaktnoj cjevčici dok se u praksi senzor postavlja na kolut sustava za dovod žice.

3.3.2. Senzori za praćenje spoja

Senzori za geometrijske parametre moraju biti u mogućnosti prikupiti informacije o geometriji spoja. To je od velike važnosti za omogućavanje praćenja spoja i korištenje tih informacija za kontrolu kvalitete zavora. Međutim, izazov postaje upotreba senzora za vrijeme zavarivanja jer je okolina izrazito nepovoljna, što uključuje visoke temperature, rasprskavanje rastaljenoga metala, intenzivnu svjetlost i velike vrijednosti jakosti struje zavarivanja. Danas se najčešće koriste optički senzori i senzori električnoga luka [34].

3.3.2.1. Optički senzori

Optički senzori koriste sljedeće osnovne principe za pronalazak spoja tijekom zavarivanja. Kod jednoga se laserska zraka projicira na žlijeb i skenira ga, a kod drugoga se koristi CCD – zraka za mjerenje značajki spoja u kombinaciji sa laserskom. Postoje i razne varijacije ovih metoda koje su također u upotrebi. Za mjerenje udaljenosti koristi se metoda triangulacije (Slika 24).



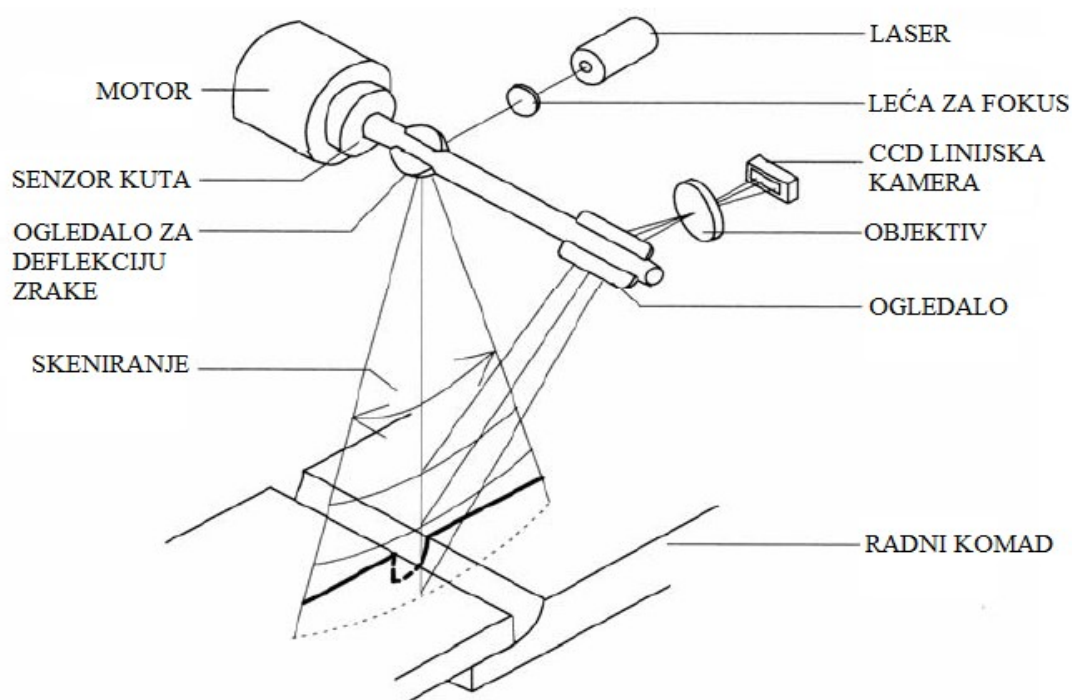
Slika 24. Prikaz metode triangulacije [34]

Laserska zraka se fokusira na predmet pomoću reflektirane zrake koja prolazi kroz leću senzora i mjeri se udaljenost između senzora i predmeta. Ako je predmet blizu senzora, kut između ulazne i reflektirane zrake je veliki, odnosno ako je predmet daleko kut se smanjuje.

Detekcija udaljenosti se vrši pomoću mjerenja fokusirane reflektirane zrake na detektor koji je u većini slučajeva polje CCD senzora.

Ovisno o pripremi i geometriji spoja, on može reflektirati zraku poput ogledala. Na primjer na V – pripremi se laserska svjetlost može odbijati u više refleksijskih položaja s različitim intenzitetima. Zbog toga ovi senzori moraju imati sposobnost obrađivanja slike u realnom vremenu zbog filtriranja nepoželjnih refleksija. Visokoreflektivni materijali mogu uzrokovati probleme kod zavarivanja te se zbog toga na njima prvo moraju izvesti testovi funkcionalnosti [34].

Glavna upotreba triangulacije kod zavarivanja je za praćenje spoja, a to zahtijeva mjerenje geometrije spoja. To se ostvaruje tehnikom skeniranja zrakom uzduž zavarenog spoja. Tijekom skeniranja senzor određuje 2D sliku profila spoja. Kada se robot kreće moguće je dobiti geometrijski model koji sadrži kompletni 3D opis spoja. Slika 25 prikazuje praćenje zavora pomoću principa skeniranja i metode triangulacije.



Slika 25. Praćenje zavora pomoću principa skeniranja i metode triangulacije [34]

Ovi optički senzori imaju sposobnosti ne samo za praćenje spoja. Podaci koje oni prikupljaju uključuju volumen zavara, veličinu zračnosti, odstupanja itd. Laserski čitači su precizni i snažni senzori koji ispunjavaju većinu zahtjeva unutar procesa zavarivanja.

Međutim, moraju se postaviti na pištolj za zavarivanje i zauzimaju prostor. Također su relativno skupi pa se zbog toga više koriste elektrolučni senzori [34].

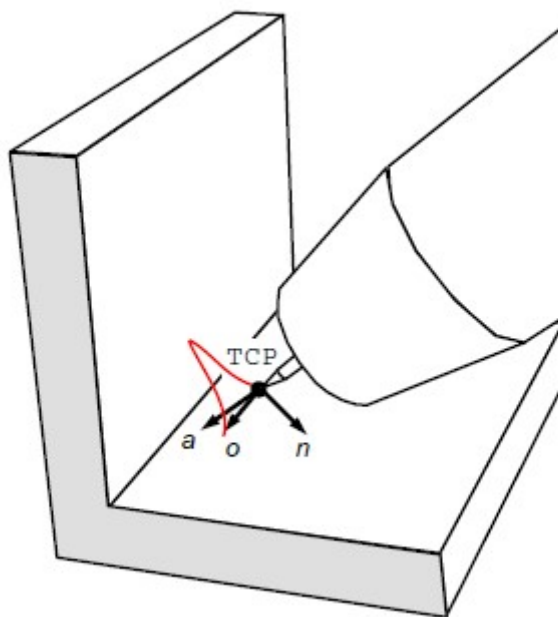
3.3.2.2. Električni luk kao senzor

Prva i osnovna stvar koju je potrebno ostvariti kod robotiziranih sustava zavarivanja je sposobnost preciznoga praćenja spoja koji se zavaruje. Razlog je što kvaliteta zavarenoga spoja ne ovisi samo o geometriji zavara već i o položaju taline. Predprogramirana putanja ne može biti ostvarena željenom preciznosti jer uvijek postoje neka odstupanja koja se javljaju u odnosu na definirani put. Praćenje spoja koristeći se njihovim pištolja i samim električnim lukom kao senzorom pojavilo se osamdesetih godina prošloga stoljeća. Princip ove metode je korištenje promjene struje koja nastupa kada se mijenja udaljenost između kontaktne vodilice i radnoga komada. Osnovno načelo ove pojave relativno je jednostavno i isplativo te se zbog toga vrlo često koristi kao metoda praćenja spoja kod stanica za robotsko zavarivanje. Približni odnos između napona (U), jakosti struje (I) i udaljenosti kontaktne vodilice i radnoga komada (l) može se prikazati izrazom 1 [34]:

$$U = \beta_1 I + \beta_2 + \frac{\beta_3}{l} + \beta_4 l \quad (1)$$

Konstante β_1 , β_2 , β_3 i β_4 ovise o vrsti žice, zaštitnome plinu i karakteristikama izvora struje. Kao što se može vidjeti iz jednadžbe iznad, kada se mijenja vrijednost l obrnuto proporcionalno se mijenja i struja električnoga luka I . To svojstvo se koristi kod robotiziranoga zavarivanja kada se radi tehnikom njihovanja.

Na slici 26 prikazani su središnja točka alata (TCP) i ortonormalni koordinatni sustav $n - o - a$. Njihanje se izvodi u smjeru osi n , koordinatna os o predstavlja smjer suprotan smjeru zavarivanja, a u smjeru koordinate a se prilazi spoju.



Slika 26. Prikaz središnje točke alata i ortonormalnog koordinatnog sustava $n - o - a$ [35]

Zbog velikoga broja prednosti elektrolučni senzori su najčešće korišteni senzori u praksi. Za primjenu njihove tehnologije nije potreban niti jedan drugi senzor što ih čini vrlo jednostavnima i isplativima. Nadalje, moguće ih je primijeniti u sustavima sa zatvorenim petljama, a u usporedbi sa optičkim sensorima su jeftiniji. Dodatno, ovi senzori pripadaju u skupinu beskontaktnih senzora i ne dolaze u dodir sa procesom zavarivanja [34].

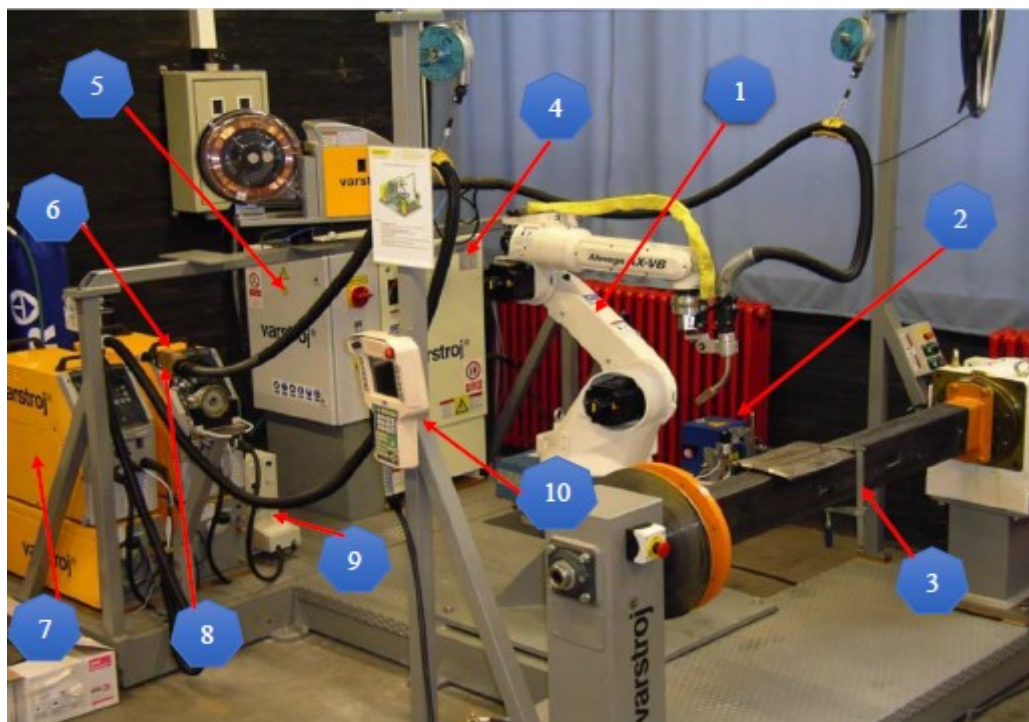
4. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Zadatak je bio odrediti tehnologiju zavarivanja i na robotskoj stanici načiniti programe za tri varijante prijenosa metala kod MAG postupka zavarivanja, tj. za kratke spojeve, štrcajući luk i impulsni luk. Na temelju komparativne analize dobivenih rezultata bilo je potrebno odrediti optimalnu varijantu zavarivanja. Nagrizanje makroizbrusaka ispitnih uzoraka izvedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala.

4.1. Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnoga dijela rada

4.1.1. Oprema za zavarivanje

Zavarivanje uzoraka provedeno je robotskom stanicom Almaga OTC AX V6. Robot ima šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja na osnovi kojih je u pripadajućem radnom prostoru moguće postići precizno pozicioniranje i orijentiranje pištolja za zavarivanje. Opremljen je i privjeskom za učenje pomoću kojega se izvršava on-line programiranje, što se odnosi na snimanje putanje i definiranje tehnoloških parametara za zavarivanje. Na slici 27 prikazana je robotska stanica Almaga OTC AX V6.



Slika 27. Robotska stanica Almaga OTC AX V6 [36]

Dijelovi od kojih se sastoji navedena robotska stanica su:

- 1) robot OTC Almega AX V6
- 2) sustav za čišćenje sapnice, rezanje žice i naštrcavanje sredstva protiv naljepljivanja kapljica
- 3) pozicioner P250V ROBO
- 4) izvor struje robotske ruke
- 5) upravljačka jedinica robota
- 6) izvor struje Varstroj VPS 4000
- 7) izvor struje TIG VARTIG 3500 DC/AC
- 8) sustav za automatsku izmjenu pištolja
- 9) senzor za praćenje električnog luka AX-AR
- 10) privjesak za učenje.

Uz prikazane dijelove, robotska stanica ima i shock senzor koji reagira u slučaju kolizije robota s objektima iz okoline.

Izvor struje VPS 4000 omogućuje zavarivanje s tri različita postupka zavarivanja, MIG/MAG konvencionalno, MIG/MAG impulsno i REL zavarivanje obloženim elektrodama. U tablici 2 dane su karakteristike izvora struje.

Tablica 2. Karakteristike izvora struje [37]

Izvor struje		Varstroj VPS 4000
Priključni napon, V/Hz		3 ~ 400 / 50
Područje struje zavarivanja, A		30 - 400
Područje napona zavarivanja, V		15,5 - 34
Intermitencija, A	100%	400
	50%	283
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 - 1,2 (1,6)
Masa, kg		45
Dimenzije (D x Š x V), mm		653 x 300 x 595

4.1.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal korišten je opći konstrukcijski čelik S235 (HRN EN 10025-2).

U tablici 3 prikazan je kemijski sastav (max. vrijednosti) osnovnoga materijala, a u tablici 4 njegova mehanička svojstva.

Tablica 3. Kemijski sastav čelika S235 [38]

Kemijski element	C	Mn	P	S	Si
Maseni udio elementa, %	0,22	1,6	0,05	0,05	0,05

Tablica 4. Mehanička svojstva čelika S235 [37]

Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Istezljivost, %
360-510	235	25

U provedbi eksperimentalnoga dijela rada korištene su pločice osnovnoga materijala debljine 10 mm.

4.1.3. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za izradu uzoraka korištena je puna žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d. trgovačkog imena EZ – SG 2 promjera 1,2 mm. Na slijedećoj stranici slikom 28 prikazana je specifikacija dodatnoga materijala koji je korišten pri provedbi pokusa.

EZ - SG 2

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO₂ ili mješavine plinova Ar/CO₂. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstruktivski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični ljev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R _{eL} N/mm ²	R _m N/mm ²	A ₅ %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	C	Mn	Si	Cu
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

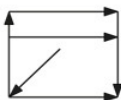
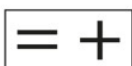
C1 ili M21

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)
1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)	
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)	
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)	
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)	

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS);
RINA (3YS); TÜV



Slika 28. Specifikacija dodatnoga materijala [39]

4.1.4. Zaštitni plin

U eksperimentu je korišten trokomponentni zaštitni plin Ferroline C6X1 proizvođača Messer.

Tablicom 5 prikazan je sastav mješavine.

Tablica 5. Sastav mješavine Ferroline C6X1

Naziv proizvoda	Volumni sastav, %		
	Ar	O ₂	CO ₂
Ferroline C6X1	93	1	6

Slika 29 prikazuje boce sa zaštitnim plinovima.

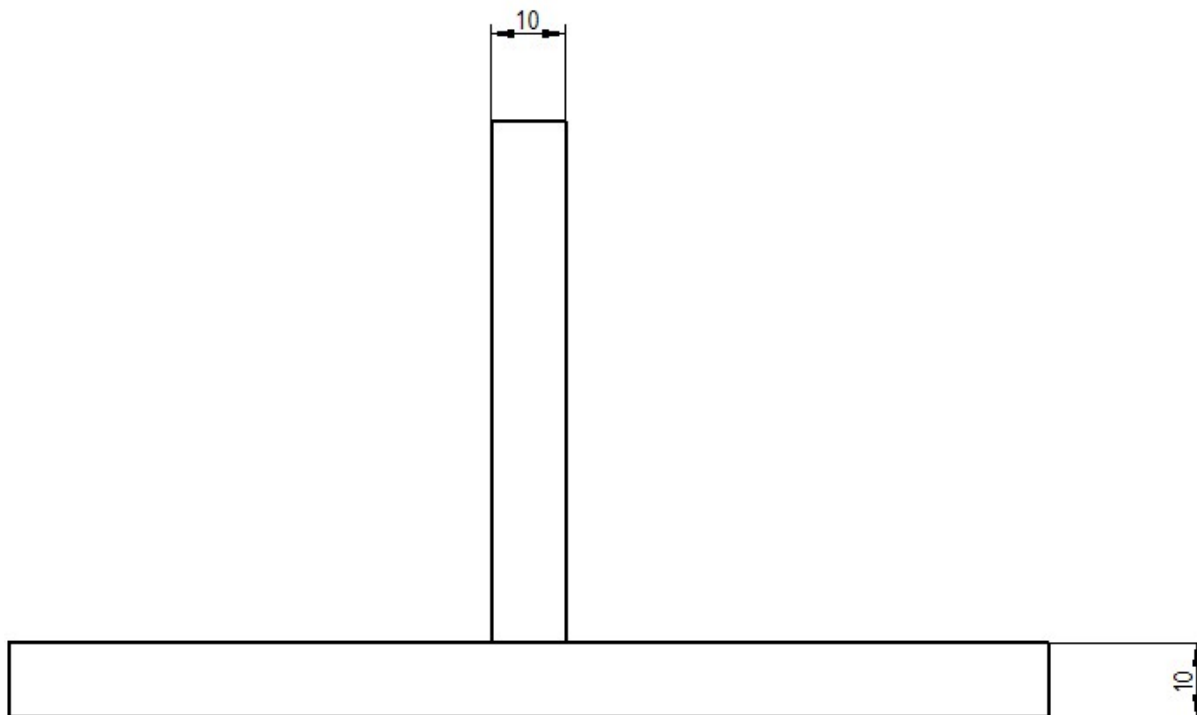


Slika 29. Boce sa zaštitnim plinovima

4.2. Priprema spoja

Za eksperimentalni dio završnoga rada pripremljen je kutni spoj. Na pločama nisu rađene dorade (nema skošenja) i postavljene su tako da nema zračnosti između njih.

Na slici 30 prikazane su potrebne debljine zavarivanih ploča.



Slika 30. Prikaz debljina zavarivanih ploča

4.3. Zavarivanje uzoraka

Prije provedbe postupka zavarivanja bitno je izdvojiti još jedan važan podatak, a to je unos topline. Poznavajući ostale parametre procesa zavarivanja unos topline je tada moguće izračunati prema izrazu:

$$Q = \frac{U \times I \times 60}{v_w \times 1000} \times \eta \quad (2)$$

Gdje je:

Q – unos topline u zavar, kJ/cm

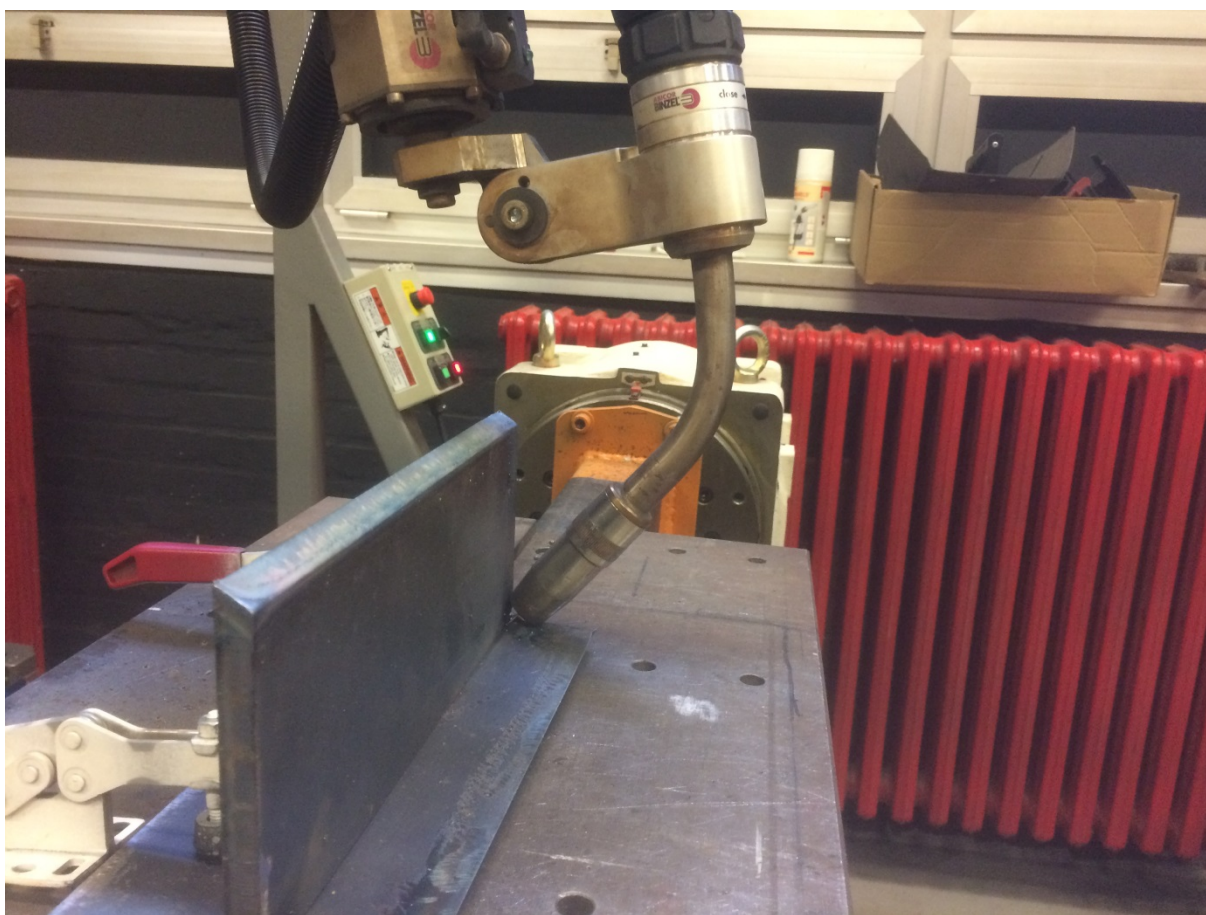
η – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (kod MAG postupka iznosi 0,8)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min

Provedeno je zavarivanje triju uzoraka osnovnoga materijala čelika S235. Svaki od uzoraka je zavaren s drugim načinom prijenosa metala, tako da je prvi uzorak zavaren u području parametara kratkih spojeva, drugi štrcajućim lukom te treći uzorak impulsnim načinom prijenosa metala. Slobodni kraj žice iznosio je 12 mm. Zavari su izvedeni u jednome prolazu povlačenjem. Korištena je neutralna tehnika zavarivanja, a pištolj je bio nagnut približno pod 45° (Slika 31).

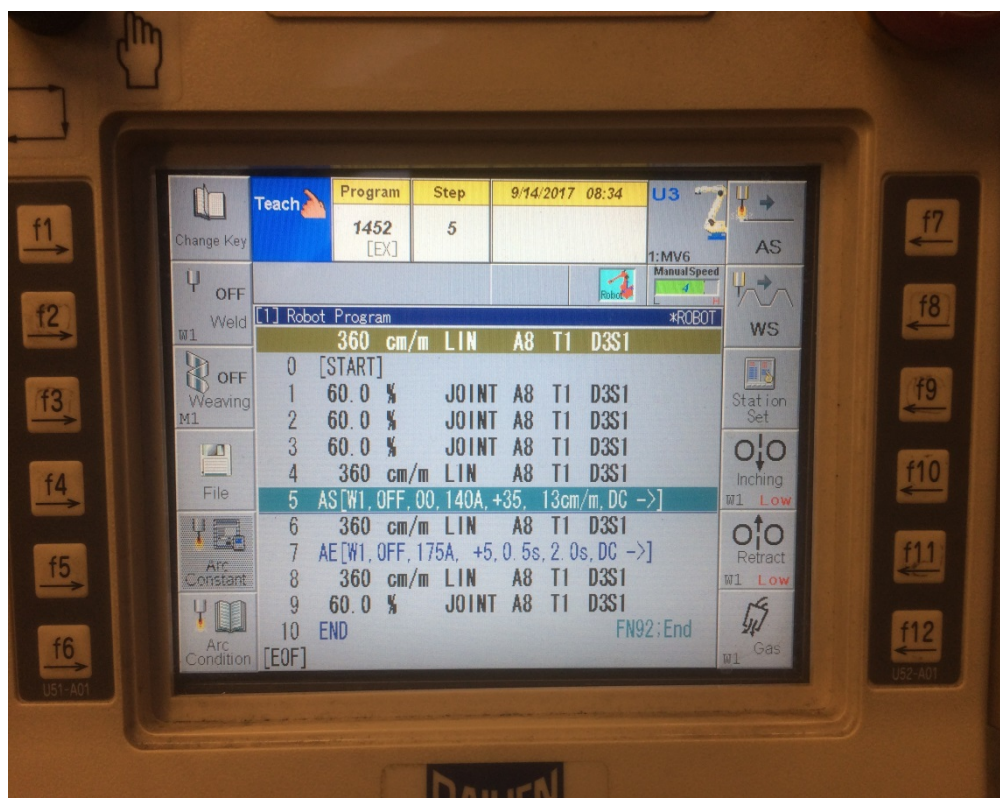


Slika 31. Prikaz kuta pištolja za zavarivanje

Radni komad je bio stegnut kako ne bi došlo do pomicanja geometrije i promjene programirane putanje pištolja tijekom procesa zavarivanja.

4.3.1. Uzorak 1

Prije provedbe zavarivanja bilo je potrebno izraditi program za robotizirano zavarivanje. Program je izrađen u programskom softveru robota za zavarivanje korištenjem privjeska za učenje on-line metodom programiranja. Za zavarivanje prvoga uzorka u programu su definirani jakost struje zavarivanja u iznosu od 140 A (područje kratkih spojeva) i brzina zavarivanja u iznosu 13 cm/min (Slika 32). Program se nastoji napraviti što kraćim i jednostavnijim kako bi se uštedilo na vremenu, što je jako bitna stvar u nekoj konkretnoj proizvodnji.



Slika 32. Program za zavarivanje uzorka 1

Za vrijeme zavarivanja uzoraka bilo je potrebno pratiti iznose struje i napona na uređaju za zavarivanje jer stroj ne radi točno onako kako su mu definirani parametri preko privjeska za učenje, već on sam sebi prilagođava parametre struje i napona prema sinergijskoj krivulji i u skladu s time obavlja proces zavarivanja.

Parametri zavarivanja uzorka 1 navedeni su u tablici 6.

Tablica 6. Parametri zavarivanja ispitnoga uzorka 1

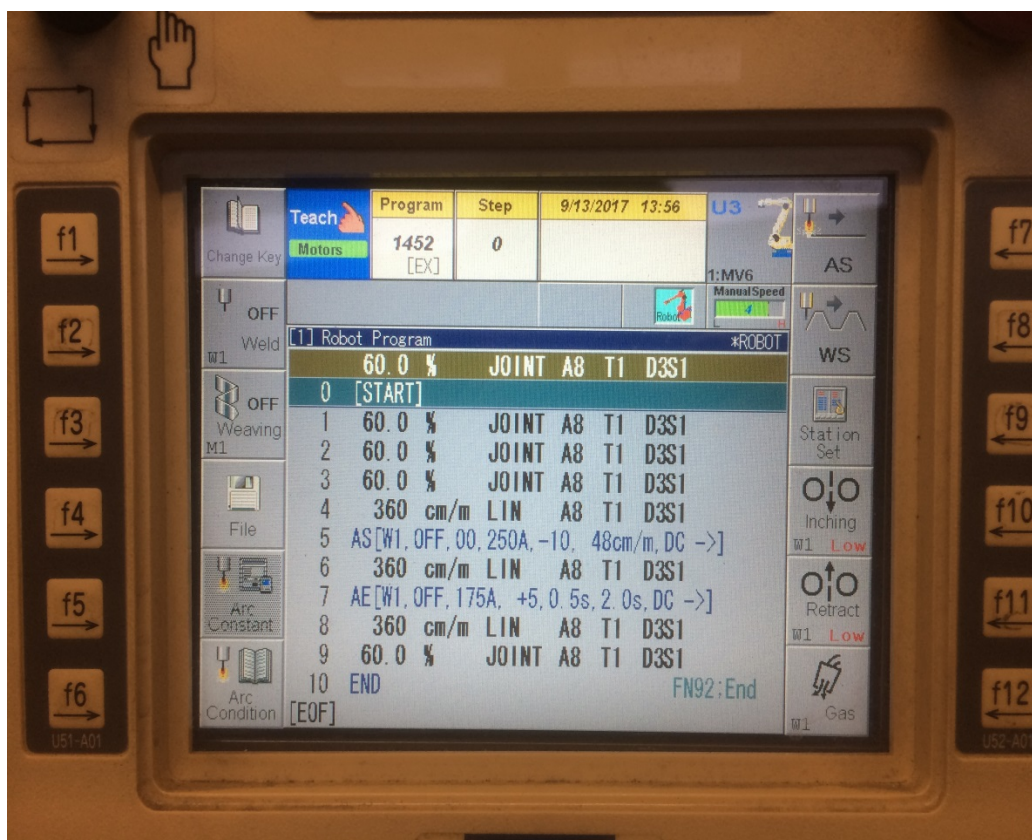
PARAMETRI ZAVARIVANJA	UZORAK 1
Brzina zavarivanja, cm/min	13
Protok plina, l/min	18
Očitana jakost struje, A	130
Očitani napon, V	21
Promjer žice, mm	1,2
Brzina dodavanja žice, m/min	2,9
Unos topline, kJ/cm	10,08

Ispitni uzorak 1 nakon zavarivanja prikazan je na slici 33.

**Slika 33. Uzorak 1**

4.3.2. Uzorak 2

Program izrađen za zavarivanje uzorka 1 može se koristiti i kod zavarivanja uzorka 2. Dimenzije uzorka su bile jednake tako da i putanja gibanja pištolja ostaje ista. No najbitnija razlika među uzorcima je ona u parametrima procesa. Zavarivanje uzorka 1 izvodilo se prijenosom metala kratkim spojevima dok se zavarivanje uzorka 2 mora provesti u području parametara štrcajućega luka. Tako da se u program unose druge vrijednosti struje i brzine zavarivanja. Vrijednost jakosti struje na privjesku je namještena na 250 A, a brzina zavarivanja na 48 cm/min. Program za zavarivanje uzorka 2 može se vidjeti na slici 34.



Slika 34. Program za zavarivanje uzorka 2

Parametri zavarivanja uzorka 2 navedeni su u tablici 7.

Tablica 7. Parametri zavarivanja ispitnoga uzorka 2

PARAMETRI ZAVARIVANJA	UZORAK 2
Brzina zavarivanja, cm/min	48
Protok plina, l/min	18
Očitana jakost struje, A	280
Očitani napon, V	26
Promjer žice, mm	1,2
Brzina dodavanja žice, m/min	9,8
Unos topline, kJ/cm	7,28

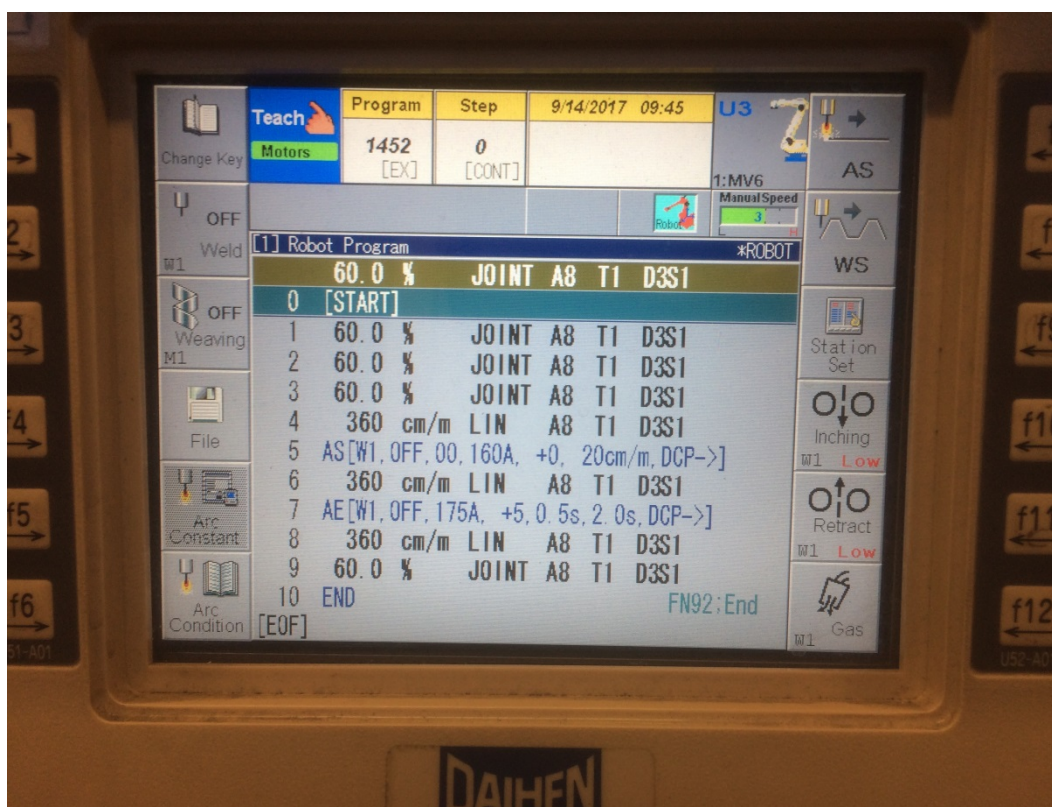
Ispitni uzorak 2 nakon zavarivanja prikazan je na slici 35.

**Slika 35. Uzorak 2**

4.3.3. Uzorak 3

Kako su pripremljene ploče za zavarivanje sva tri uzorka bile jednake, na početku napravljeni program ostaje isti što se tiče putanje gibanja pištolja za zavarivanje. No pošto se kod trećega uzorka radilo o zavarivanju impulsnim načinom prijenosa metala potrebno je bilo u točkama 5. i 7. umjesto opcije *Mag DC* odabrati opciju *Mag DC – Pulse*. Tako je u upravljačku jedinicu poslana informacija o promjeni načina prijenosa metala. Također, potrebno je i podesiti struju i brzinu zavarivanja. U privjesak je unesena vrijednost jakosti struje od 160 A i brzina zavarivanja 20 cm/min.

Na slici 36 prikazan je program za zavarivanje uzorka 3.



Slika 36. Program za zavarivanje uzorka 3

Parametri zavarivanja uzorka 3 navedeni su u tablici 8.

Tablica 8. Parametri zavarivanja ispitnoga uzorka 3

PARAMETRI ZAVARIVANJA	UZORAK 3
Brzina zavarivanja, cm/min	20
Protok plina, l/min	18
Očitana jakost struje, A	175
Očitani napon, V	24
Promjer žice, mm	1,2
Brzina dodavanja žice, m/min	4,5
Unos topline, kJ/cm	10,08

Ispitni uzorak 3 nakon zavarivanja prikazan je na slici 37.

**Slika 37. Uzorak 3**

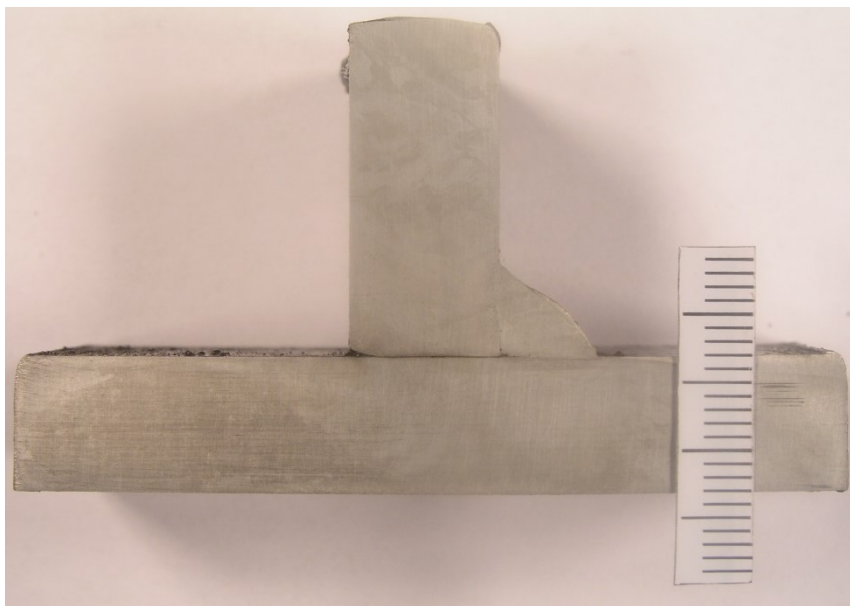
4.4. Izrada makroizbrusaka

Izrada makroizbrusaka uzoraka 1, 2 i 3 odvijala se je u Laboratoriju za zavarivanje u nekoliko koraka:

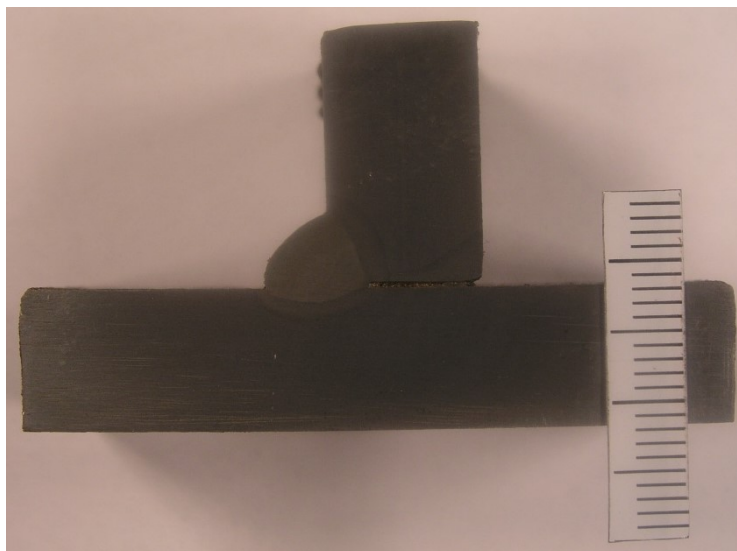
- skraćivanjem na manje dimenzije plinskim rezanjem na stroju
- piljenjem na konačne dimenzije tračnom pilom
- grubim brušenjem na tračnoj brusilici (granulat trake – 150)
- ručnim brušenjem na brus papiru (granulat – 320)
- ručnim brušenjem na brus papiru (granulat – 500)

Nakon što je pomoću najfinijega brusnoga papira dobivena glatka površina poprečnoga presjeka zavara, potrebno ju je nagristi sa 5 % otopinom nitala. Nital je je otopina dušične kiseline (HNO_3) u alkoholu. Nagrizanje materijala izvršeno je na način da se materijal uronio u otopinu i u njoj držao određeno vrijeme. Nakon nagrizanja površinu je potrebno isprati mlazom vode, isprati alkoholom te osušiti. Ovaj postupak se proveo u Laboratoriju za zaštitu materijala.

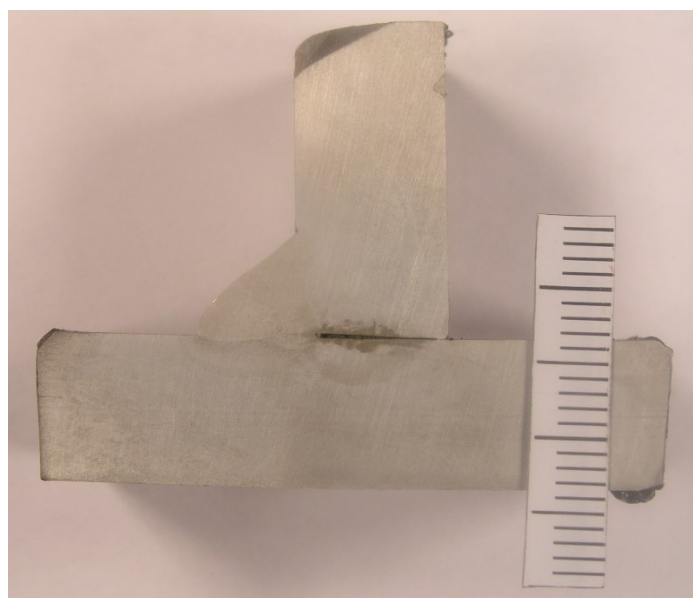
Na tako obrađenim uzorcima dobiva se vidljiva razlika u poprečnome presjeku između dodatnoga i osnovnoga materijala, te dubina penetracije. Na slikama 38, 39 i 40 prikazani su makroizbrusci presjeka zavara nakon nagrizanja u nitalnoj otopini.



Slika 38. Makroizbrusak presjeka zavara – uzorak 1



Slika 39. Makroizbrusak presjeka zavora – uzorak 2

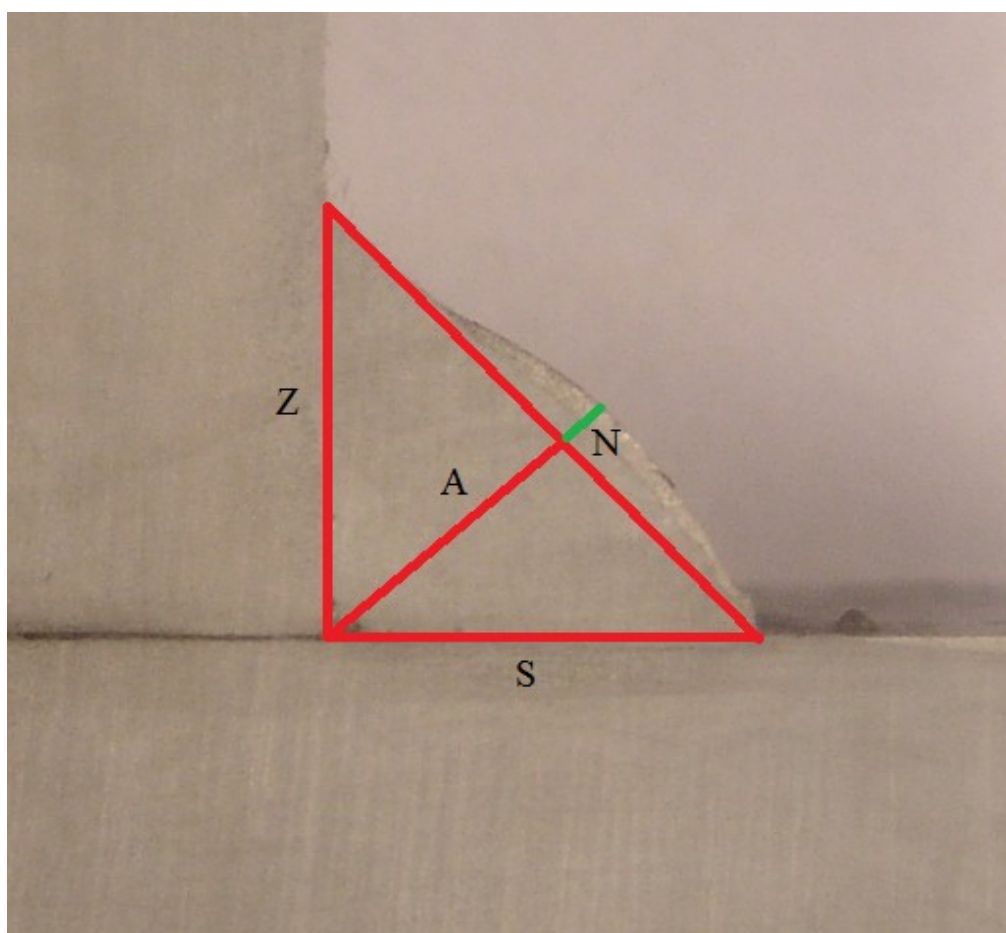


Slika 40. Makroizbrusak presjeka zavora – uzorak 3

4.5. Geometrija zavora

U geometriji zavora bilo je potrebno izmjeriti bitne dimenzije zavora kao što su debljina zavora, nadvišenje zavora, penetracija itd. Mjerenje je provedeno u programu ImageJ na makroizbruscima presjeka zavora koji su fotografirani u Laboratoriju za materijalografiju.

Na slici 41 prikazano je mjerenje karakterističnih dimenzija zavora uzorka 1.



Slika 41. Prikaz mjerenja karakterističnih dimenzija zavora uzorka 1

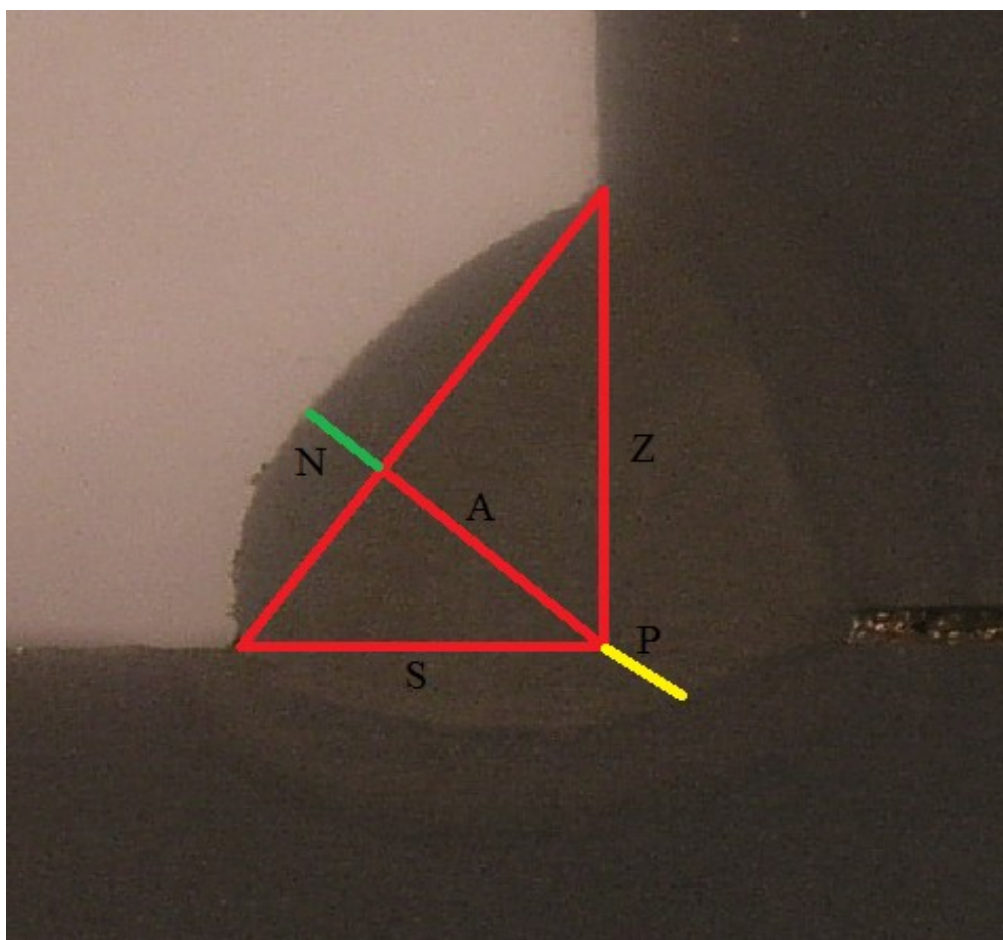
U tablici 9 su prikazane vrijednosti karakterističnih dimenzija zavora uzorka 1.

Tablica 9. Vrijednosti karakterističnih dimenzija zavora uzorka 1

UZORAK 1	
Z, mm	6,707
S, mm	6,362
A, mm	4,588
N, mm	0,781
P, mm	0

Sa slike 41. se primjećuje da kod zavora uzorka 1 ne postoji penetracija u osnovni materijal.

Na slici 42 prikazano je mjerenje karakterističnih dimenzija zavora uzorka 2.



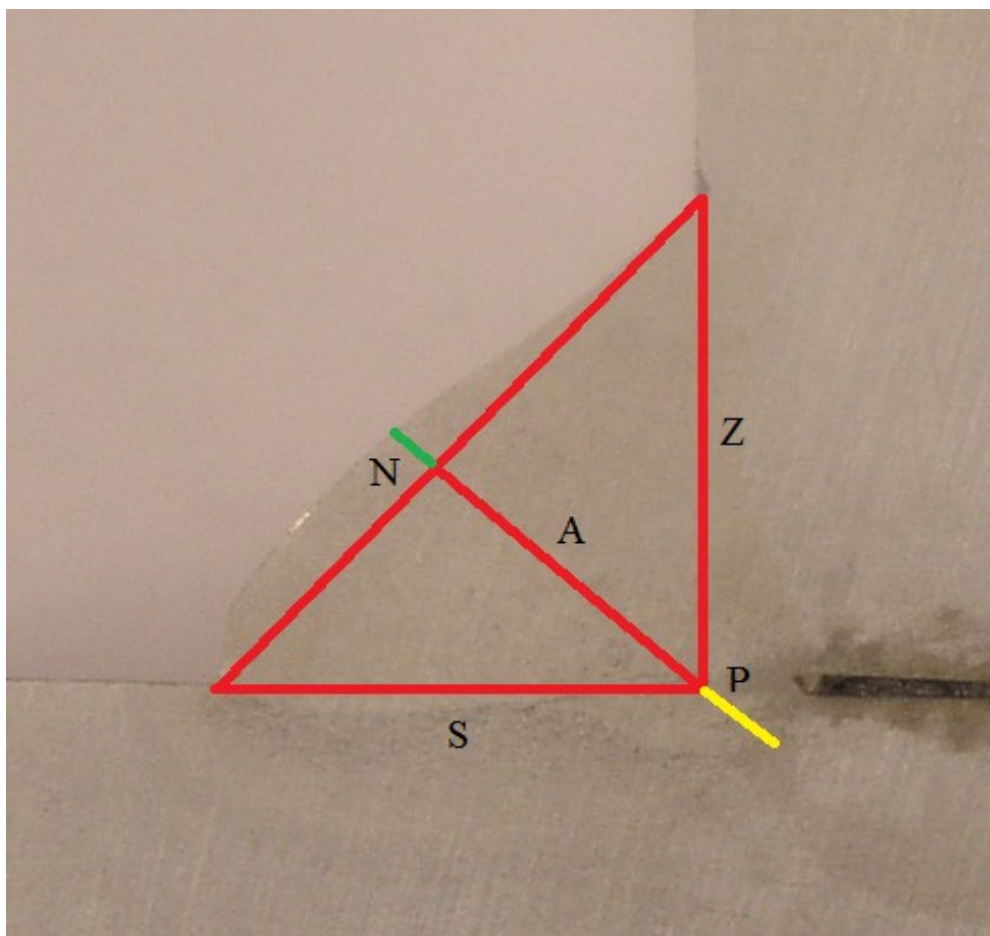
Slika 42. Prikaz mjerenja karakterističnih dimenzija zavora uzorka 2

U tablici 10 su prikazane vrijednosti karakterističnih dimenzija zavora uzorka 2.

Tablica 10. Vrijednosti karakterističnih dimenzija zavora uzorka 2

UZORAK 2	
Z, mm	5,338
S, mm	3,999
A, mm	3,169
N, mm	0,998
P, mm	1,011

Na slici 43 prikazano je mjerenje karakterističnih dimenzija zavara uzorka 3.



Slika 43. Prikaz karakterističnih dimenzija zavara uzorka 3

U tablici 11 su prikazane vrijednosti karakterističnih dimenzija zavara uzorka 3.

Tablica 11. Vrijednosti karakterističnih dimenzija zavara uzorka 3

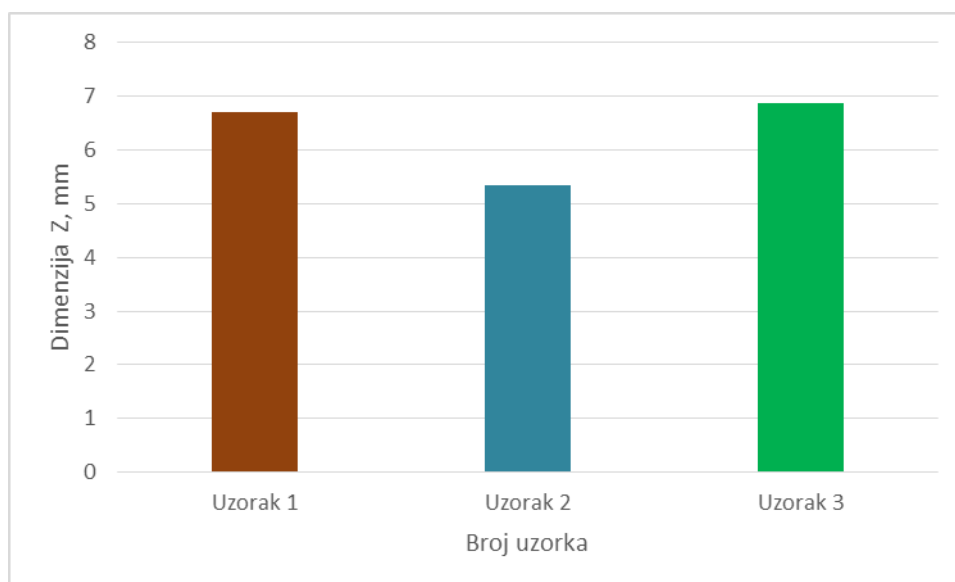
UZORAK 3	
Z, mm	6,878
S, mm	6,430
A, mm	4,706
N, mm	0,731
P, mm	1,031

U tablici 12 dan je skupni prikaz vrijednosti karakterističnih dimenzija uzoraka.

Tablica 12. Skupni prikaz vrijednosti karakterističnih dimenzija uzoraka

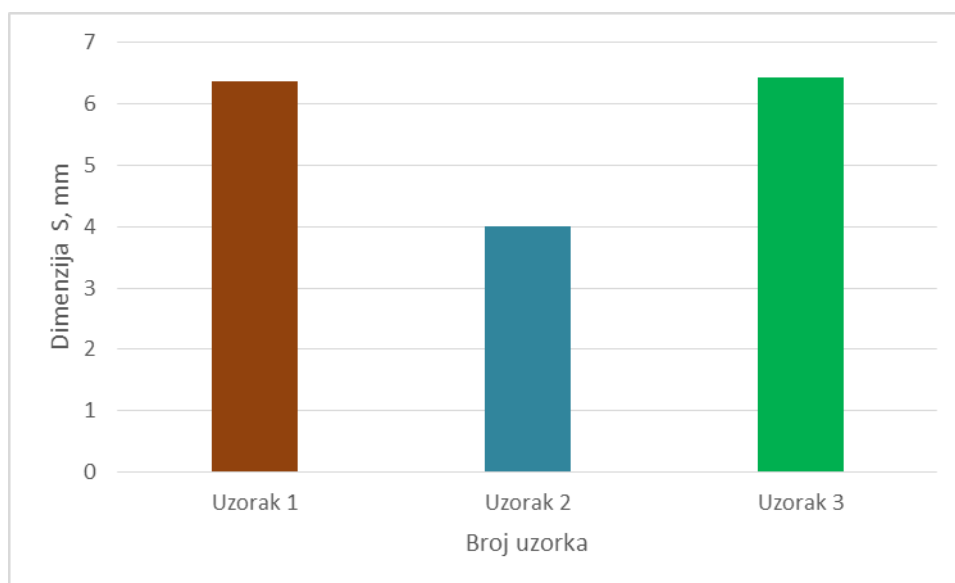
Mjerena dimenzija, mm	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
Z	6,707	5,338	6,878
S	6,362	3,999	6,43
A	4,588	3,169	4,706
N	0,781	0,998	0,731
P	0	1,011	1,031

Na slici 44 prikazan je histogram u kojem su uspoređene dimenzije Z zavora po uzorcima.



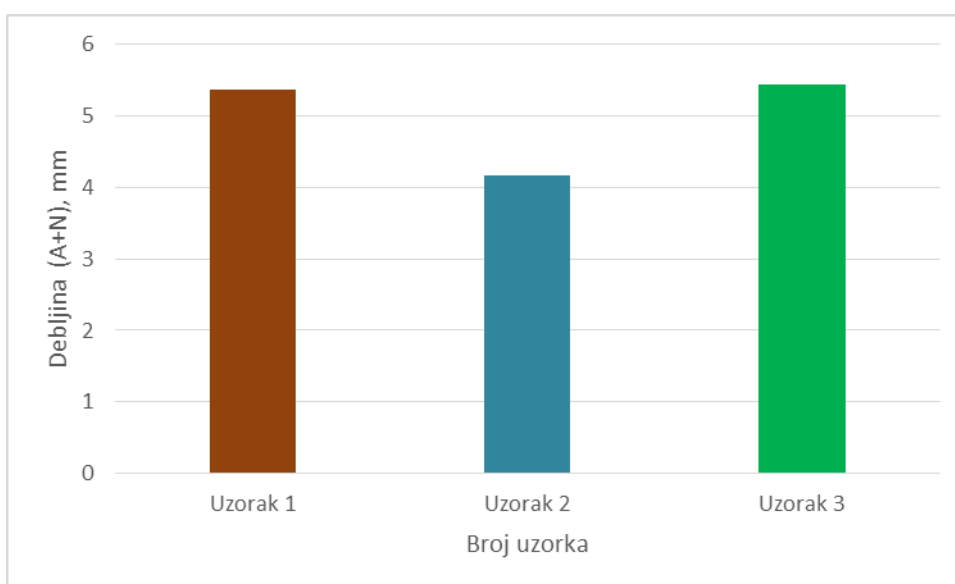
Slika 44. Usporedba dimenzija Z zavora po uzorcima

Na slici 45 prikazan je histogram u kojem su uspoređene dimenzije S zavara po uzorcima.



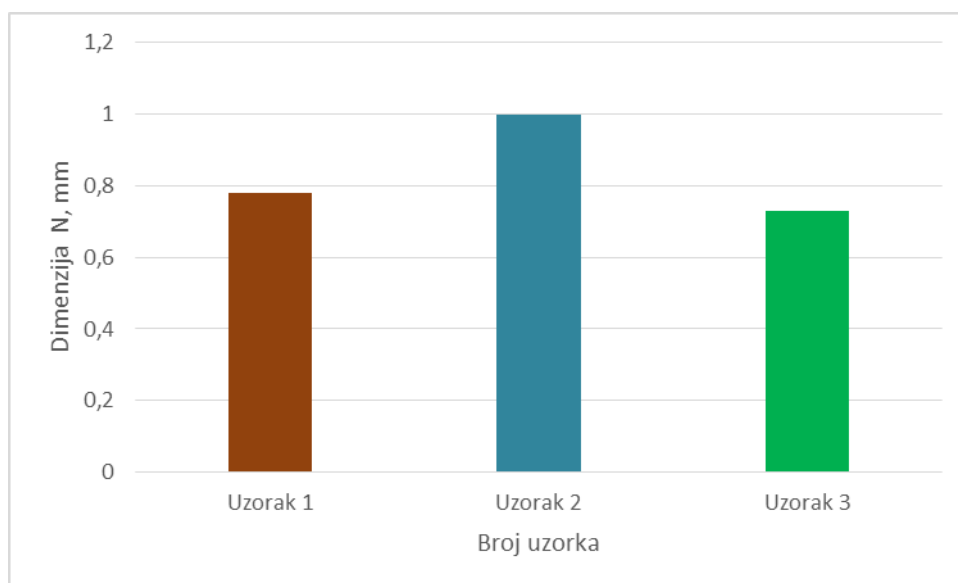
Slika 45. Usporedba dimenzija S zavara po uzorcima

Na slici 46 prikazan je histogram u kojem su uspoređene debljine (A+N) zavara po uzorcima.



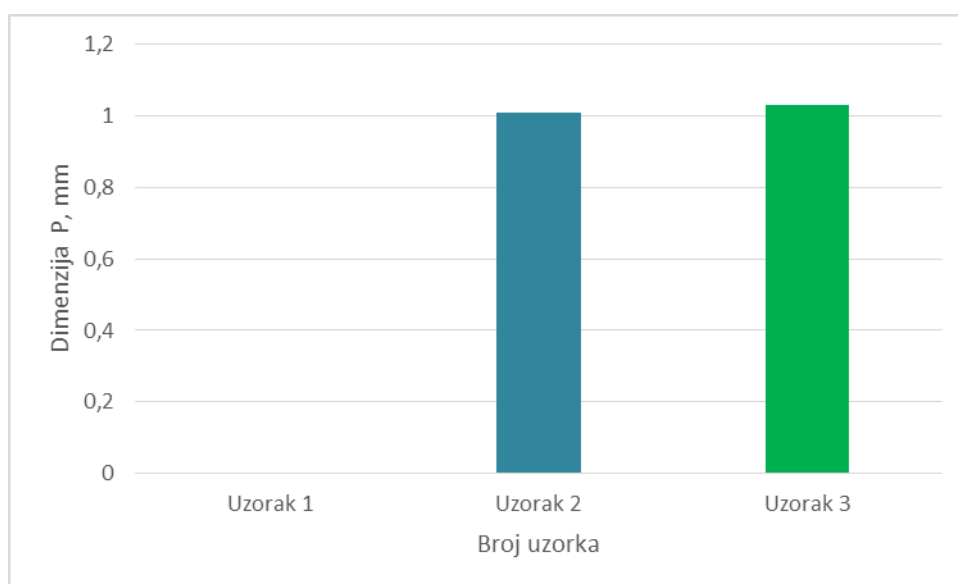
Slika 46. Usporedba debljina zavara po uzorcima

Na slici 47 prikazan je histogram u kojem su uspoređene dimenzije N zavora po uzorcima.



Slika 47. Usporedba dimenzija N zavora po uzorcima

Na slici 48 prikazan je histogram u kojem su uspoređene dimenzije P zavora po uzorcima.



Slika 48. Usporedba dimenzija P zavora po uzorcima

Analizom dobivenih rezultata može se utvrditi da uzorak 1 nije zadovoljio, tj. da zavar nije dobro izveden. Vizualnom kontrolom to nije bilo moguće utvrditi, ali nakon izrade makroizbruska greška je odmah uočena. Na fotografiji makroizbruska jasno je vidljivo da je došlo do pojave naljepljivanja, talina dodatnoga materijala samo je nalegla na površinu osnovnoga materijala. Ne postoji penetracija u osnovni materijal. Iako zavar naizgled djeluje dobar, s katetama približno jednakih duljina, debljine koja malo odstupa od definirane, nadvišenja manjega nego kod uzorka 2, on nije prihvatljiv. Mogući uzroci ovakvoga stanja leže u lošijoj pripremi spoja, premaloj struji zavarivanja (130 A) te neadekvatnoj tehnici rada.

Za uzorak 2 može se zaključiti da je tehnologija zavarivanja donekle pogođena. Na temelju makroizbruska je vidljiva penetracija u osnovni materijal, no zavar nije simetričan. Razlika u duljinama kateta je očigledna. Debljina zavora u odnosu na uzorak 1 i uzorak 3 više odstupa, kao i njegovo nadvišenje. Protaljšivanje u osnovni materijal približno je jednako onome od uzorka 3. Jedan od pokazatelja zbog čega je došlo do ovakve geometrije zavora je vrijednost unosa topline. Iznos unosa topline prema tablici 7 iznosi 7,28 kJ/cm. To je dosta manje od izračunatoga iznosa unosa topline uzorka 1 i 3 koji iznosi (jednak za oba) 10,08 kJ/cm. Matematika je jasna te se može zaključiti da je za zavarivanje uzorka 2 odabrana prevelika brzina zavarivanja, smanjivanjem te brzine uz nepromijenjene ostale parametre približilo bi se unosu topline uzorka 1 i 3 te ostvarilo prihvatljiviju geometriju spoja. Još jedan mogući uzrok ovakvih svojstava je nagib pištolja kod zavarivanja. Ako bi se pištolj držao položitijski sprječilo bi se razlijevanje taline na donju stranu kutnoga spoja.

Uzorak 3 u usporedbi s prethodna dva uzorka se pokazao kao najbolji. Već vizualnom kontrolom prije rezanja makroizbruska vidljiva je ujednačenost zavora. Katete su približno jednakih duljina, kao i kod uzorka 1. Debljina zavora malo odstupa od 5 mm koliko je zadano zadatkom. Iznos nadvišenja mu je manji i od iznosa uzorka 1 i uzorka 2. Pokazuje veće protaljšivanje u osnovni metal u odnosu na uzorak 2. Prema ovome se potvrđuje da je prijenos metala impulsnim lukom za provedbu ovoga pokusa bolji izbor u odnosu na prijenos metala kratkim spojevima i štrcajućim lukom.

5. ZAKLJUČAK

Svrha automatizacije u industriji je prije svega zamijeniti čovjeka kod izvršavanja fizički teških, napornih i monotonih poslova u proizvodnim okruženjima. Kod robota se ne javlja umor, pad koncentracije ili neka druga ograničenja svojstvena čovjeku. To im omogućuje neprestano ponavljanje zadaće, tj. funkcije za koju su namijenjeni. Razvoj robotske tehnologije za područje zavarivanja bio je od velikoga značaja. To se najbolje može vidjeti velikim rasponom robota koji se primjenjuju u zavarivačkoj industriji. Međutim, novi napretci koji dolaze na tome polju povećat će autonomiju u izvođenju zavarivačkih zadataka. To možda nije važno u današnjem robotiziranome zavarivanju, ali s kraćim proizvodnim serijama, bržim povećanjem količine proizvodnje i općim trendom za većom fleksibilnosti kako bi se zadovoljili zahtjevi tržišta, doći će potreba za više autonomnih robota. . Cilj takvih robotskih stanica nije samo ostvarenje veće autonomije procesa, već i poboljšanje kvalitete i produktivnosti proizvodnje.

U eksperimentalnome dijelu završnoga rada provedeno je zavarivanje kutnoga spoja na tri ispitna uzorka. Kod svakoga uzorka primijenjen je drugi način prijenosa metala u električnome luku, uzorak 1 se zavarivao u području parametara kratkih spojeva, uzorak 2 se zavarivao štrcajućim lukom, a uzorak 3 impulsnim načinom prijenosa metala. Na robotskoj stanici pomoću privjeska za učenje *on-line* metodom programiranja napravljeni su programi za zavarivanje uzoraka. Nakon zavarivanja uzoraka i izrade makroizbrusaka zaključuje se da uzorak 1 nije dobro zavaren pošto se je pojavila greška naljepljivanja. Zavarivanje uzorka 2 je uspjelo, ali nije ostvarena željena geometrija spoja. Uzorak 3 se pokazao najboljim prema dobivenoj geometriji zavara. Na temelju komparativne analize rezultata geometrije zavarenih spojeva kao optimalna varijanta za zavarivanje uzorka odabire se prijenos metala impulsnim lukom.

LITERATURA

- [1] Horvat, M., Kondić, V. : The examples of modified procedures of MIG/MAG welding, Technical journal 6, 2(2012), 137 – 140
- [2] https://www.researchgate.net/publication/263161624_Measurement_of_arc_light_spectrum_in_the_mag_welding_method Dostupno: 28. 08. 2017.
- [3] Garašić, I., prezentacija: MIG/MAG postupak zavarivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [4] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [5] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Justification of the application of MAG forceArc process in the construction of steel structures, Technical journal 8, 3(2014), 288-294
- [6] Jurica, M.: Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenog spoja čelika X80, Doktorski rad, 2015.
- [7] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarcl-56/c4200.pdf Dostupno: 29. 08. 2017.
- [8] Mikulić, I.: Visokoučinski postupci MAG zavarivanja, Završni rad, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2016.
- [9] https://books.google.hr/books?id=uU0gBN2aYSgC&pg=PA238&lpg=PA238&dq=globular+transfer+jeffus&source=bl&ots=kLiosiKhjt&sig=xIP0gKuSEUg_k53iFdGWVxSlFeM&hl=hr&sa=X&ved=0ahUKEwiTiZLn_f7VAhXJWRQKHSI7A6sQ6AEIMjAF#v=onepage&q=globular%20transfer%20jeffus&f=false Dostupno: 30. 08. 2017.
- [10] Kožuh, Z., Garašić, I.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [11] <http://www.oldshigh.ca/documents/homework/120103cp6.0.pdf> Dostupno: 30. 08. 2017.
- [12] Rudan, M.: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, 4. Seminar Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 24. 05. 2007.
- [13] Kah, P., Latifi, H.: Usability of arc types in industrial welding, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 9(2014)

- [14] https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/resources/bookspamphlets/mig_handbook.pdf Dostupno: 02. 09. 2017.
- [15] <http://internet.savannah.chatham.k12.ga.us/schools/wts/staff/Kennedy/Shared%20Documents/Welding%20and%20Metal%20Fabrication/chapter11.pdf>
Dostupno: 02. 09. 2017.
- [16] http://www.electro-cal.com/pdf/MIG_Welding.pdf Dostupno: 02. 09. 2017.
- [17] http://www.gobizkorea.com/att/cat/ht6918/tp_html/img/ht6918_cat_3_small_img_2.bmp Dostupno: 03. 09. 2017.
- [18] Rudan, M.: Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG), Postupci zavarivanja i njihov utjecaj na kvalitetu i troškove u proizvodnji (jednodnevni seminar), Pula, 08. 12. 2005.
- [19] Kah, P., Shrestha, M.: Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2015.
- [20] Bolmsjo, G., Olsson, M., Caderberg, P.: Robotic Arc Welding – Trends and Developments for Higher Autonomy, Industrial Robot, 2002., 98 – 104
- [21] https://media.robots.com/robots/1460234775_1.jpg Dostupno: 11. 09. 2017.
- [22] Ryuh, B., Pennock, G.: Arc Welding Robot Automation Systems, 2006.
- [23] https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/products/advanced-mig/motoman_xrc_2001_control_with_auto_axcess.pdf?la=en Dostupno: 11. 09. 2017.
- [24] https://www.g-w.com/pdf/sampchap/9781605253213_ch02.pdf
Dostupno: 13. 09. 2017.
- [25] <https://www.robots.com/motoman/ma1400> Dostupno: 13. 09. 2017.
- [26] <http://www.daihen-varstroj.si/automation-and-robotisation/> Dostupno: 13. 09. 2017.
- [27] <https://www.kukakore.com/arc-welding/> Dostupno: 13. 09. 2017.
- [28] <http://www.avp.si/robotika/welding-robot-fanuc> Dostupno: 14. 09. 2017.
- [29] <http://www.daihen-usa.com/products> Dostupno: 14. 09. 2017.
- [30] http://www.robot-welding.com/welding_fixtures.htm Dostupno: 16. 09. 2017.
- [31] <http://www.igmrobotwelding.co.uk/product/52-work-piece-periphery/>
Dostupno: 16. 09. 2017.
- [32] <https://www.ircoautomation.com/products/welding-positioners/tilt-rotate-positioners-2/>
Dostupno: 16. 09. 2017.
- [33] https://library.e.abb.com/public/afa4a02296514aeb91f5932a8a7000f7/PR10300EN_R1_TSC_2013.pdf Dostupno: 16. 09. 2017.

- [34] Garašić, I., Kožuh, Z., Remenar, M.: Sensors and their classification in the fusion welding technology, *Tehnički Vjesnik*, 4 (2015), 1069 – 1074
- [35] Fridenfalk, M., Bolmsjo, G.: Design and validation of a sensor guided robot control system for welding in shipbuilding, *International Journal for the Joining of Materials*, 4 (2002), 44 – 55
- [36] Karaga, I.: Analiza primjene tehnike njihanja pri robotiziranom MAG zavarivanju, *Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [37] http://www.varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/vs_eng/vps-4000-digit-eng.html Dostupno: 19. 09. 2017.
- [38] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022> Dostupno: 19. 09. 2017.
- [39] <http://www.elektroda-zagreb.hr/proizvodi/zice.html> Dostupno: 19. 09. 2017.

PRILOZI

I. CD-R disc